INVESTIGACION y CIENCIA

¿PUEDE VENCERSE EL SIDA?

ASI SE FORMAN LOS TORNADOS

EL HOMBRE DE ATAPUERCA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



CRISTALES CON MEMORIA

OCTUBRE 1995
800 PTAS.



Octubre de 1995 Número 229



4 

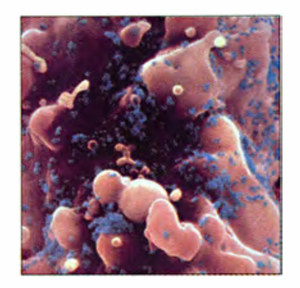
Recuerdos de una guerra nuclear
Philip Morrison

En el cincuentenario del bombardeo de Hiroshima y Nagasaki, este célebre físico y escritor reflexiona sobre la era nuclear. Miembro del proyecto Manhattan, vio cómo la fisión pasó de ser una eficaz amenaza dibujada en una pizarra a convertirse en el fundamento de las armas más terribles jamás conocidas. Morrison fue testigo ocular de la devastación sufrida.

10 

Tornados
Robert Davies-Jones

Los embudos que producen ingentes catástrofes constituyen solamente la porción inferior de un fenómeno ciclónico complejo. Sirviéndose de un arsenal de instrumentos transportados por tierra y aire, los meteorólogos han comenzado a identificar las condiciones atmosféricas que crean tales vórtices de vientos, capaces de cambiar súbitamente su dirección.

20 

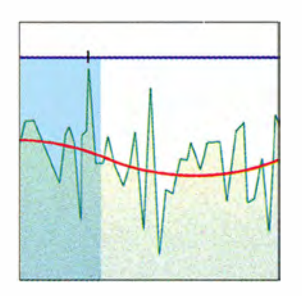
Así destruye el sida las defensas inmunitarias
Martin A. Nowak y Andrew J. McMichael

Las personas infectadas con el virus del sida no suelen presentar síntomas de la patología hasta pasados unos diez años. Esa latencia podría resultar del enfrentamiento entre el virus y las defensas. Durante mucho tiempo, las fuerzas antagónicas se hallan en equilibrio, pero llega un momento en que la aparición de una aplastante variedad de mutantes arruina toda respuesta.

42 

Los yacimientos de Atapuerca
Emiliano Aguirre

Los depósitos del sistema kárstico de la sierra burgalesa de Atapuerca contienen una información singular sobre evolución del clima, la vegetación, los recursos animales y la industria humana en el Pleistoceno Medio por la diversidad de tipos de vestigios y procesos, por la amplitud del período comprendido, la fina calibración cronológica y los escasos vacíos de registro.

52 

Las virtudes del ruido de fondo
Frank Moss y Kurt Wiesenfeld

Todo el que haya intentado escuchar la radio a través del crepitar de los estáticos sabe lo que molesta el ruido de fondo. Pero no siempre es así; a veces la "resonancia estocástica" hace que las fluctuaciones del nivel de ruido amplifiquen las señales débiles; este efecto desempeña un papel central en el sistema nervioso y posibilita sensores más finos.

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



56 

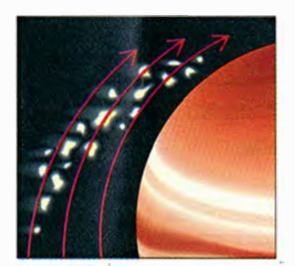
Fisiología de la enfermedad por descompresión
Richard E. Moon, Richard D. Vann y Peter B. Bennett

En su ascenso tras una larga inmersión, los buceadores con escafandra autónoma pueden sufrir un episodio de descompresión. Se sabía que el culpable de los síntomas era la presencia de burbujas en la sangre, pero sólo recientemente los fisiólogos han descubierto su origen.

66 

Comunicación en las ranas
Peter M. Narins

El fuerte croar de las ranas puede parecer un coro, pero es exactamente lo contrario: cada animal está tratando de hacerse oír por encima del estrépito. Con este fin, usan un notable conjunto de adaptaciones acústicas que les permiten encajar sus cantos en silencios de fracciones de segundo.

72 

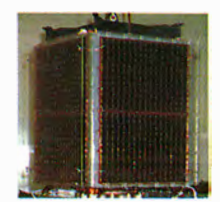
El encuentro del cometa Shoemaker-Levy 9 con Júpiter
David H. Levy, Eugene M. Shoemaker y Carolyn S. Shoemaker

El impacto de este cometa con el mayor planeta de nuestro sistema solar fue inolvidable, un suceso que no se repetirá durante milenios. Transcurrido un año, los astrónomos que identificaron el cometa reflexionan sobre su descubrimiento y lo que se ha aprendido desde entonces.

SECCIONES

3 Hace...

30 Perfiles

32  **Ciencia y sociedad**

Primer satélite universitario español.

40 De cerca

82 Taller y laboratorio

86 Juegos matemáticos

La forma de las lágrimas: un engaño consentido.

90 Libros

96 Ensayo

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. P. Campos: *Recuerdos de una guerra nuclear*; M. Puigcerver: *Tornados*; E. Santiago: *Así destruye el sida las defensas inmunitarias*; Ana M.ª Rubio: *Fisiología de la enfermedad por descompresión*; Joandomènec Ros: *Comunicación en las ranas*; Mónica Murphy: *El encuentro del cometa Shoemaker-Levy 9 con Júpiter*; A. Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace* y *Taller y laboratorio*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*; J. M.ª García de la Mora: *Ensayo*

Ciencia y sociedad:

Juan Pedro Campos y Joandomènec Ros

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Portada: Gregory Manchess

Página	Fuente
6	Laboratorio Nac. de Los Alamos
7	UPI/Bettmann; Lab. Nacional de Los Alamos (*inserto*)
8	Laboratorio Nac. de Los Alamos
10-11	Howard B. Bluestein
12-13	Tomo Narashima;
14-15	Matthew Arrott; R. Wilhelmson (*arriba*); David Sams (*abajo*)
16	Jerry M. Straka, Joshua Wurman y Erik Rasmussen
17	Jim Argo, *SABA*
18	Christopher R. Church
21	Lennart Nilsson, Boehringer Ingelheim International
22-27	Dimitry Schidlovsky
28	Lennart Nilsson, BII
43	Mariano Bautista, Museo Nac. de Ciencias Naturales (*foto*); Servicio Geográfico del Ejército, Grupo Espeleológico "Edelweiss" de Burgos (*plano*)
44	E. Aguirre
45	Juan Carlos Díez y Silvia Nuere
46	E. Aguirre y Silvia Nuere
47	M. Bautista
48	Javier Trueba
49	E. Aguirre y Silvia Nuere
50	Museo Nac. de Ciencias Naturales
52-53	Joe Schwartz (*arriba*); Laurie Grace (*centro* y *abajo*)
54	William Roston (*fotografía*); Laurie Grace (*gráfico* y *dibujo*)
57	David Doubilet
58	Rodica Prato
59	Universidad de Duke
60	Dan Burton
61	Karl Gude
62	Robert Devoe
63	Jared Schneidmann/JSD
66-67	Roberto Osti
68	Johnny Johnson y Roberto Osti
69	Laurie Grace
70	Roberto Osti (*arriba*); Johnny Johnson (*abajo*)
71	Peter M. Narins
72-73	James V. Scotti (*izquierda*); Heidi B. Hammel y NASA (*derecha*)
74-75	(*de izquierda a derecha*) Paul W. Chodas; cortesía de Eugene Shoemaker; Keith Schreiber; Terence Dickinson; NASA; Alan Levenson; Tomo Narashima
76-77	(*de izda. a dcha.*) J. S./JSD; Eugene y Carolyn Shoemaker y David Levy; NASA; Peter J. McGregor y Mark Allen, Univ. Nac. Australiana; Heidi B. Hammel y NASA; Space Telescope Science Institute y NASA; Harold A. Weaver y T. Ed Smith; J. S./JSD, fuente: Paul W. Chodas (*abajo*)
78-79	(*de izda. a dcha.*) Laboratorio de Propulsión a Chorro; J. S./JSD; Telescopio espacial Hubble y NASA; E. Shoemaker, Paul J. Hassig y David J. Roddy



Una aterrorizada submarinista asciende a toda prisa a la superficie. Tal vez sea por un pequeño problema en el equipo o por haber avistado cualquier animal de aspecto amenazador (casi siempre inofensivo). Y ahí está el peligro real: al contener la respiración la submarinista, la presión puede desgarrar los pulmones y dejar salir gas al torrente sanguíneo. La embolia originará entonces una lesión neurológica (*véase* "Fisiología de la enfermedad por descompresión", por R. E. Moon, R. D. Vann y P. B. Bennett, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
EDICIONES José María Valderas, *director*
ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal, *directora*
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
Carmen Lebrón Pérez
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfono (93) 414 33 44 Telefax (93) 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
BOARD OF EDITORS Michelle Press, *Managing Editor*; Marguerite Holloway, *News Editor*; Ricki L. Rusting, *Associate Editor*; Timothy M. Beardsley; W. Wayt Gibbs; John Horgan, *Senior Writer*; Kristin Leutwyler; Madhusree Mukerjee; Sasha Nemecek; Corey S. Powell; David A. Schneider; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam; Glenn Zorpette
PRODUCTION Richard Sasso
CHAIRMAN AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER John J. Hanley
CO-CHAIRMAN Dr. Pierre Gerckens
DIRECTOR, ELECTRONIC PUBLISHING Martin Paul

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono (93) 414 33 44
Fax (93) 414 54 13

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	8.800	16.000
Extranjero	9.700	17.800

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 800 pesetas
Extraordinario: 1.000 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA

Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. (91) 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono (93) 414 33 44

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. (91) 409 70 45 – Fax (91) 409 70 46

Cataluña y Baleares:
Miguel Munill
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona
Tel. (93) 321 21 14
Fax (93) 414 54 13

Difusión controlada

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Filmación: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A., Avila, 112-114 4ª pl. - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Avda. Carrilet, 237 - 08907 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotocayfo, S.A., Ctra. de Caldes, km 3 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Hace...

...cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Según un proyecto reciente sería posible embarcar en aviones equipos de retransmisión para transmitir televisión y frecuencia modulada desde altitudes del orden de los diez mil metros, donde casi desaparecen las limitaciones inherentes a las ondas ultracortas. Ocho estaciones "Stratovision" podrían sustituir a unas cien estaciones repetidoras terrestres. Cuando se sopesan las posibilidades técnicas y los costes, resulta que "las ideas de los soñadores locos" son de hecho una anticipación de un futuro no tan lejano tal como lo contemplan un grupo de ingenieros realistas.»

«El uso previsto de plásticos en embarcaciones menores viene a ser como una revolución a pequeña escala dentro de la construcción naval. En el pasado el esmerado esfuerzo de artesanos expertos construía embarcaciones de buenas condiciones marineras con teca, caoba y latón, sin que nadie osara desafiar a la tradición. Pero a raíz de Pearl Harbor surgió la necesidad de construir pequeños buques a miles sin sacrificar las cualidades marineras.»

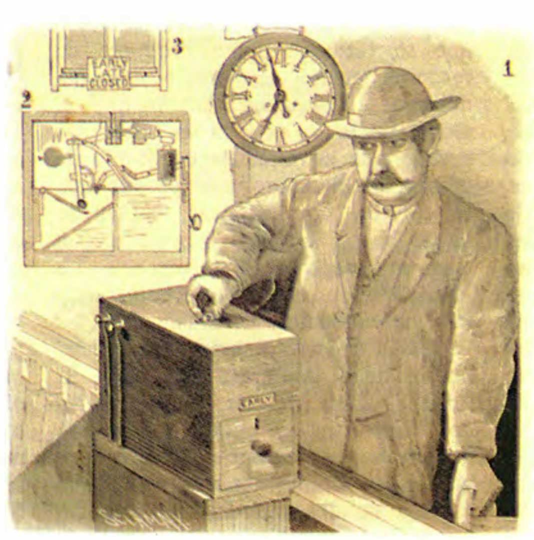
«En los vuelos transoceánicos las tripulaciones disponen de todas las ayudas a la navegación conocidas. La deriva del aparato debida al viento lateral se comprueba mediante unos pequeños frascos de vidrio llenos de aluminio pulverizado, los cuales, cuando se dejan caer desde el avión, se rompen al chocar con la superficie del océano y producen una mancha plateada visible durante millas.»

«Ray Russell, proyectista industrial, ha ideado y construido el llamado automóvil Quadratic Drive. Un sistema hidráulico elimina el embrague, la caja de cambios, el árbol de transmisión, los puentes diferenciales y los frenos. El motor acciona una bomba hidráulica y ésta impulsa a un fluido, a través de conductos flexibles, hacia las cuatro ruedas, en cada una de las cuales hay montado un motor hidráulico. La potencia de frenado se aplica regulando la velocidad del fluido hidráulico.»

...cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Nos acaba de dejar un hombre grande entre los grandes. Louis Pasteur hizo por mejorar la condición humana mucho más que cualquier otro, vivo o muerto; su mano sanadora será percibida hasta el fin de los tiempos. Los médicos pugnaban ciegamente con un enemigo al que eran incapaces de ver y que se manifestaba sólo por sus fatales efectos. Pasteur arrojó la claridad de la luz de la ciencia sobre ese enemigo y puso en manos de los médicos un procedimiento seguro para exterminarlo.»

«El diario telefónico organizado en Pest (Hungría) lleva ya dos años funcionando con éxito. Su nombre es Telephone Hirnondo, o Heraldo, cuesta dos centavos, igual que un diario impreso, y es muy útil a las personas incapacitadas. Un cable especial de 270 km de largo corre a lo largo de las ventanas de los domicilios de los suscriptores y en el interior de éstos unos cables flexibles, lo bastante largos, permiten que el receptor llegue hasta el lecho o cualquier otro lugar de la habitación. Para rellenar el tiempo muerto, sin noticias, a los suscriptores se les entretiene con conciertos corales e instrumentales.»



Reloj de control eléctrico de Jardine

«En las arenas del suramericano río Volador puede encontrarse oro en abundancia; pero en aquel lugar los mosquitos son tan terribles y de tal tamaño que hasta ahora han fracasado todos los intentos para desposeer aquellas arenas de su oro. Un italiano se mofó de la idea de que los mosquitos pudieran expulsar a nadie de un sitio donde el oro pueda recogerse casi a mano. Con su grupo de seis personas no soportó ni media hora la horrible tortura.»

«Charles K. Jardine, de Oban (Escocia), ha patentado un dispositivo automático para aceptar las fichas o boletos de los empleados de establecimientos fabriles, oficinas, etc. (*ilustración*). Dentro de la caja gira una palanca que lleva una placa con las palabras "temprano", "tarde", "cerrado".»

...ciento cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Se decía que la Corriente del Golfo la provocaba el Mississippi, cuyas aguas están a varios grados de temperatura por encima de la del océano contiguo; y aunque tal razón había de ser insatisfactoria para cualquier escolar que lea geografía, hasta hace poco no se descubrió una teoría racional. Según parece, hay un canal subterráneo por el que discurren las aguas del Pacífico hacia el Atlántico. De la elevada temperatura de las aguas de la Corriente del Golfo daría ahora cuenta sin dificultad el hecho de que, si ese canal subterráneo estuviese a una profundidad de cien o 120 metros, atravesaría la tierra, la temperatura de la cual es muy superior al punto de ebullición del agua.»

«Se estima que la potencia del vapor en Gran Bretaña equivale al esfuerzo de ciento setenta millones de hombres, sobre una población de sólo veintiocho millones.»

«Por increíble que pueda parecerles a nuestros escépticos lectores, es una realidad que, sobre principios racionales, se ha inventado una rueda de timón automática, o timonel artificial, capaz de guiar un buque hacia cualquier punto de la brújula que se desee. Se consigue ello merced a un motor electromagnético, que está conectado al timón y que actúa a la mínima variación de la aguja de la brújula.»

Recuerdos de una guerra nuclear

En agosto de 1945 se arrojaron dos bombas nucleares sobre Japón. El autor, partícipe en el proyecto Manhattan, reflexiona sobre el comienzo de la era atómica y lo que podría deparar el futuro tras el fin de la guerra fría

Philip Morrison

Rara vez se refiere un aniversario al comienzo mismo de un acontecimiento. Mis recuerdos del proyecto Manhattan y de la primera bomba nuclear clavan sus raíces mucho antes de agosto de 1945. La raíz principal llega hasta 1938, cuando preparaba mi doctorado en física en la Universidad de California en Berkeley, lo que no ahogaba mis inquietudes políticas y sociales. Cierta noche avanzada de aquella primavera, mis amigos y yo seguíamos despiertos sólo para oír la voz áspera del Führer, que hablaba a las masas apiñadas en Nuremberg bajo el sol de mediodía. Su tono era jactancioso, marciales sus ejércitos irrumpiendo en las fronteras de naciones vecinas. Su arenga, aunque dada al otro lado del océano y nueve horas al este, sonaba demasiado cerca. Estaba claro que no faltaba mucho para una guerra terrible contra el Tercer Reich y su Eje. Las concesiones hechas a Hitler en Munich ese otoño confirmaban nuestros miedos más hondos. La guerra mundial estaba al caer.

Por una coincidencia del destino, la física nuclear iba pronto a vincular los laboratorios universitarios al curso de la guerra y la paz. A principios de 1939 adquirió nivel de certeza la hipótesis según la cual una emisión de energía sin precedentes acompañaba la absorción de neutrones lentos por el elemento uranio. Puedo recordar el día de enero en que vi por primera vez, sobrecogido, las espigas verdes que mostraban en la pantalla del osciloscopio los enormes impulsos amplificados de electrones que liberaba uno de los dos veloces fragmentos de cada núcleo dividido de uranio.

El primer indicio de este fenómeno se había publicado hacía sólo unas semanas. Era indirecto, enigmático incluso. Los radioquímicos del laboratorio de Otto Hahn en el Instituto de Química Káiser Guillermo de Berlín —no había otro mejor— habían encontrado una intensa radiactividad residual en el bario, elemento que se formaba como producto de reacción cuando el uranio absorbía neutrones. Conviene señalar que el átomo de bario es sólo un poco más pesado que la mitad de un átomo de uranio, el elemento más pesado que se conocía por entonces. Nunca se había visto tamaña fragmentación tras una captura de neutrones. La identificación era convincente, pero las consecuencias, oscuras.

Casi al mismo tiempo, dos físicos huidos de la Alemania nazi, Otto R. Frisch y Lise Meitner (la célebre tía de Frisch), en ese momento refugiados en Suecia, comprendieron que el núcleo de uranio tenía que haberse partido en dos mitades aproximadamente iguales, liberando de paso más energía que cualquier reacción nuclear vista hasta entonces. Pronto se divulgó la noticia; fue el físico danés Niels Bohr quien la llevó a los Estados Unidos.

Más aún, parecía intrínseco al proceso de división, o de fisión, como se le llama, que con probabilidad liberase por lo menos dos neutrones en cada tanda. Dos neutrones saldrían de la primera fisión y, si las condiciones eran las adecuadas, inducirían dos sucesos de fisión más, que a su vez soltarían otros cuatro neutrones. Las fisiones que éstos causarían producirían ocho neutrones, y así sucesivamente. Se esperaba ahora una cadena de reacciones en progresión geométrica (idea que Leo Szilard, refugiado europeo recién llegado a Nueva York, había postulado en solitario durante años). La liberación a gran escala de energía nuclear, de la que tanto se había dudado, estaba por fin al alcance de la mano. Todos sabíamos que la energía que desprendería la fisión del uranio sería, kilogramo por kilogramo, un millón de veces mayor que la de cualquier combustible o explosivo químico.

El mundo en guerra

Que ello fuera importante para la guerra que ominosamente aparecía por el horizonte era inevitable. Tras oír las noticias de Europa, mis compañeros de curso y yo, un poco ingenuos en lo que se refería a la física de los neutrones, si bien con una visión que, burdamente, era correcta, elaboramos un borrador —quizá sería mejor decir que dibujamos un bosquejo— en las pizarras del despacho que compartíamos donde se mostraba un montaje, creíamos que eficaz, para una bomba. Pese a nuestras lagunas en el conocimiento del proceso, sabíamos que ese dispositivo, si pudiese construirse, sería terrible. No tengo documentación de aquellos dibujos informales, pero hay cartas muy expresivas de nuestro mentor, J. Robert Oppenheimer, cuyo despacho era contiguo al nuestro. El dos de febrero de 1939 le escribió a su viejo amigo de Ann Arbor, el físico George E. Uhlenbeck. Le resumía los hechos, pocos aunque asombrosos, y concluía: “Creo, pues, que no es muy improbable que un cubo de diez centímetros de lado de deuteruro de uranio... pudiera convertirse en un horno del infierno.”

Con el tiempo, eso sería precisamente lo que ocurriría, pero el proceso resultaría más complicado de lo que nadie imaginara al principio. Estoy absolutamente seguro de que palos de ciego similares se dieron en esas primeras semanas de 1939 por todo el mundillo de la física nuclear,

PHILIP MORRISON nació en Somerville, Nueva Jersey, en 1915, y estuvo de finales de 1942 hasta mediados de 1946 trabajando en el proyecto Manhattan. Enseñó física en la Universidad de Cornell de 1946 a 1965. Se trasladó entonces al Instituto de Tecnología de Massachusetts. Es autor principal del celebérrimo *Potencias de diez*.

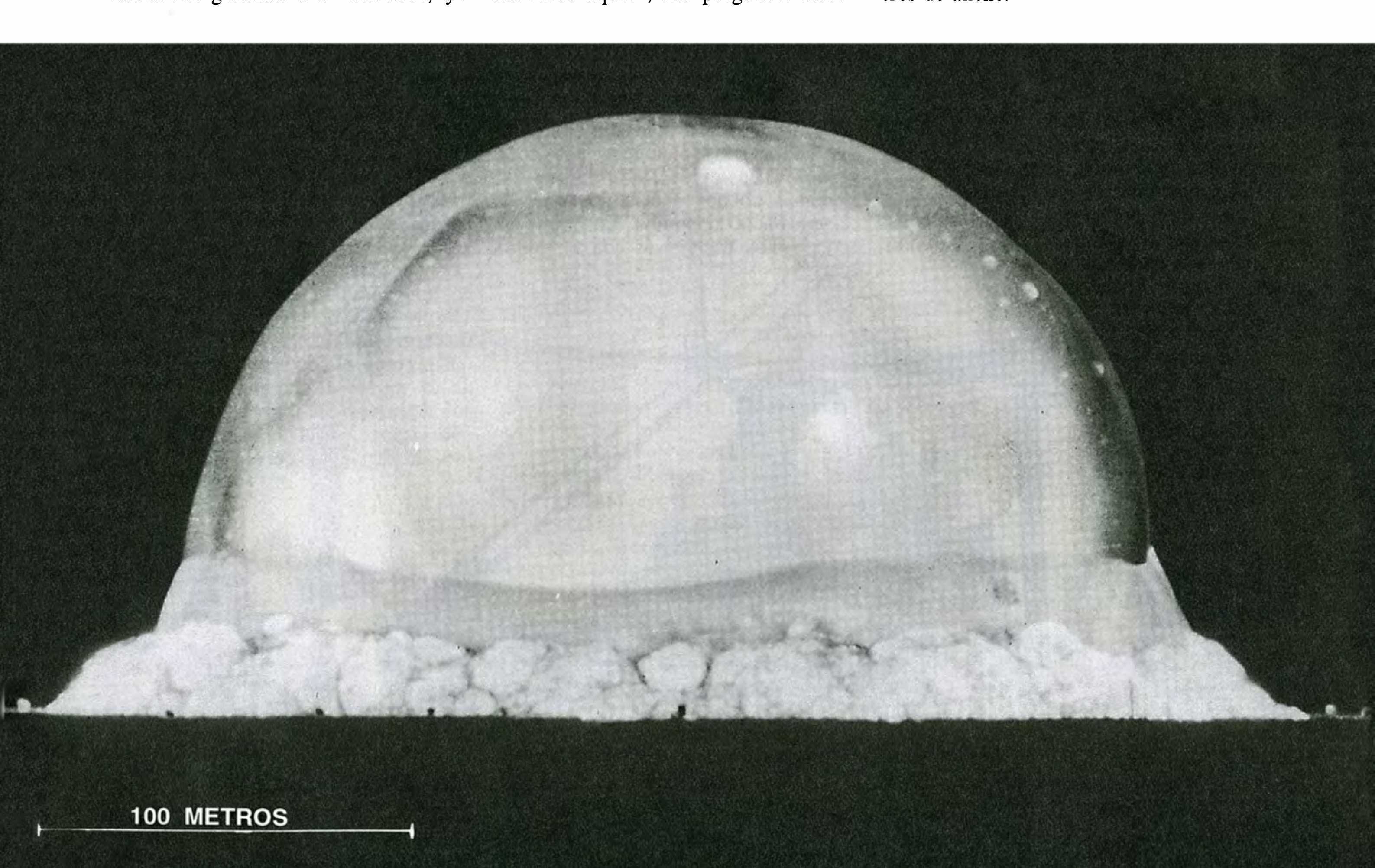
y sin duda alguna en Alemania, donde se descubrió la fisión. En el otoño de 1939, Bohr y John A. Wheeler, de Princeton, habían publicado el primer análisis completo de la física de la fisión. La valerosa Madrid había caído, y la gran guerra propiamente dicha se había declarado ya. Consta que hacia la primavera de 1940 se había encargado a varios grupos de expertos el estudio del tema en no menos de seis países: Alemania, Francia (nación que pronto se convertiría como tal en prisionera de guerra), Gran Bretaña, la Unión Soviética, los Estados Unidos y Japón. Es indiscutible que ni los gobernantes ni los jefes militares fueron quienes promovieron en un principio el potencial bélico del proceso de fisión, sino los físicos de todas esas naciones. En los Estados Unidos, por ejemplo, Albert Einstein firmó, justo cuando empezaba la guerra, la famosa carta dirigida al presidente Franklin D. Roosevelt en la que se le instaba a proseguir el desarrollo de armas nucleares.

A finales de 1941, todos esas potencias, y también Italia, estaban inmersas en una guerra, como desde hacía mucho lo estaban China y Japón. A los físicos norteamericanos, claro está, les cogió de lleno la movilización general. Por entonces, yo era instructor de física de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, adonde me trasladé para cubrir el hueco que habían dejado libre dos de mis amigos físicos de Berkeley, al enrolarse primero uno, luego el otro, que lo había reemplazado, en una misión bélica secreta. En 1942, casi todos los estudiantes varones marchaban cantando a sus clases en formación militar y estaban a disposición de las cajas de reclutamiento. El curso académico se extendió hasta cubrir los doce meses enteros; los miembros de los claustros enseñábamos a marchas forzadas y nos embarcábamos, además, en investigaciones de interés para la guerra, con generoso apoyo federal.

Otra voz del destino informa ahora mis recuerdos. Cada celebración del Día de Acción de Gracias, los físicos del Medio Oeste se reunían en Chicago. Acudí a las sesiones de 1942. Bob Christy, compañero mío en el grupo de Berkeley, se empeñó por teléfono en que le visitase sin falta en el laboratorio de la Universidad de Chicago donde estaba trabajando. Al entrar en el gótico edificio de físicas verificaron mi cita unos policías armados, insólitos en tal recinto. Encontré a Christy tranquilamente sentado en su despacho. "¿Sabes qué hacemos aquí?", me preguntó. Reconocí que era fácil adivinarlo: tenía que ser el proyecto secreto del uranio, al que tantos habían ido. "Sí", dijo con su cachaza acostumbrada, "hacemos bombas."

El plan, ambicioso, con un objetivo tan definitivo y temible, me dejó asombrado, sin palabras incluso. Christy y yo hablamos, y surgió una pregunta: ¿Cómo iba a perder nuestro bando la guerra, *a no ser que* los alemanes creasen antes armas nucleares? La tarea era, en efecto, vital; todos los físicos cuya área de competencia fuese pertinente —no eran muchos— tenían que participar. Me convencí; conté con el apoyo de mi esposa. Unas pocas semanas después aprendía en ese mismo laboratorio de Chicago a trabajar con Enrico Fermi, que ocupaba el despacho contiguo. Me alisté, por así decirlo, mientras durase la guerra, como tantos jóvenes lo habían hecho ya.

Durante el año 1943, amargo por el desarrollo de la guerra, me convertí en un eficaz ingeniero de neutrones que comprobaba una y otra



1. EL ESTALLIDO DE LA BOMBA en el ensayo de Trinity, 0,025 segundos tras la detonación en el desierto de Nuevo México. Cuando se tomó esta exposición, la explosión tenía más de trescientos metros de ancho.

vez prototipos detallados de los enormes reactores que habría que construir en Hanford, junto al río Columbia. Recuerdo también otras líneas de trabajo dentro del tenaz círculo de teóricos e ingenieros que se congregaba en torno a Eugene P. Wigner. Vi con claridad, casi como una revelación, que hasta la pequeña concentración de uranio que tenía el granito, tan abundante, proporcionaría el combustible de fisión suficiente para su propia extracción de las rocas y dejaría todavía la renta de una ingente cantidad adicional de energía. En principio sólo —la práctica no confirma todavía este sueño— una fuente de energía que emplease como combustible las montañas duraría mucho más que todos los combustibles fósiles. Propuse también (no sólo yo) un plan detallado para husmear en qué trabajaban los alemanes, y así pasé a ser consejero técnico de la nueva organización de espionaje del general Leslie R. Grove en Europa; una actividad secundaria muy sugestiva para un físico joven y, en última instancia, inquietante.

La construcción de la bomba

Aquí, en los Estados Unidos, se construían a toda velocidad dos instalaciones industriales gigantescas cuya finalidad era obtener grandes cantidades de dos explosivos nucleares distintos: uranio y plutonio, elemento éste recién descubierto. Y todos sabíamos que en alguna parte —en el secreto "Sitio Y"— se estaba trabajando en la preparación de un mecanismo de bomba que detonase esos explosivos nucleares. Pero a mediados de 1944, mientras 40.000 trabajadores techaban los reactores de la ribera del Columbia que producirían el plutonio, el Sitio Y hubo de enfrentarse a una crisis técnica imprevista. El diseño de bomba elegido era simple, a modo de un cañón: se disparaba una bala subcrítica de uranio enriquecido contra un blanco subcrítico de uranio enriquecido, provocando la explosión. Pero las mediciones efectuadas con las primeras muestras evidenciaron que ese diseño no valía en el caso del plutonio, cuando era precisamente de plutonio el material para la bomba que se estaba intentando fabricar en Estados Unidos. En ese momento, no se vio otra alternativa que el diseño de implosión, un medio complejo e incierto de ensamblaje que se había examinado antes pero que se arrumbó por la extrema dificultad que encerraba: había que comprimir metal sólido de plutonio hasta una densidad transitoriamente alta mediante una implosión bien enfocada de explosivo químico de gran potencia.

A finales del verano de 1944, vivía y trabajaba en el Sitio Y, entre las bellas mesetas y los hondos cañones de Los Alamos, Nuevo México, junto con muchos otros científicos e ingenieros. Se nos había reunido urgentemente, procedentes del vastísimo proyecto Manhattan, para multiplicar y reforzar la plantilla original de Los Alamos, plagada de estrellas pero demasiado pequeña para afrontar la nueva ingeniería del diseño de implosión.

La información que teníamos de los laboratorios alemanes nos convenció, a finales de 1944, de que los alemanes no nos iban a ganar en la carrera hacia la bomba. En enero de 1945 estaba trabajando con el grupo de Frisch, que había adquirido habilidad en el ensamblaje de masas subcríticas de material nuclear, a las que había que juntar para obtener la masa supercrítica necesaria para la liberación de energía. En realidad, nos arriesgamos temerariamente a "tirar de la cola del dragón" y formar una masa supercrítica de uranio. Hicimos una pequeña bomba de ese material muy rebajada, diluida, y dejamos que fuese apenas supercrítica por unos milisegundos. Se produjo una erupción feroz de neutrones, la primera prueba directa de una reacción en cadena explosiva.

Por primavera, el laboratorio tenía listo el diseño de una bomba de implosión de plutonio; lo había preparado Christy, y estaba ya programada su prueba a escala real. Dos miembros del grupo de Frisch (Marshall G. Holloway y yo) fuimos nombrados ingenieros G; la G era la abreviatura de "gadget" —chisme—, apelativo cifrado de la bomba de implosión. Eramos los responsables de los dos primeros núcleos de metal de plutonio que se producirían. Teníamos que especificar hasta los menores detalles del proyecto; en cuanto llegó el suficiente compuesto de plutonio, se nos encargó que creásemos con los recursos de Los Alamos los núcleos, preparásemos su manejo y, en julio, estuviésemos listos para montar el primer núcleo de prueba con los otros sistemas de esa arma compleja. Pero en junio la batalla de Alemania había terminado; en cambio, la guerra con Japón era más terrible que nunca. Seguimos con la aún incierta bomba; era nuestro leal deber hacia nuestro país y los líderes en los que confiábamos, ¿quizá demasiado?

De acuerdo con lo previsto, el ensayo de Trinity, la primera prueba de una bomba nuclear, se realizó el 16 de julio de 1945. Dejó en mí recuerdos indelebles. Ninguno tan intenso como el fogonazo de calor que azotó mi cara. Luminoso como un sol de mediodía para un observador que estaba a más de quince kilómetros de distancia, en el frío desierto,

2. PREPARANDO LA TORRE de la bomba dos días antes del ensayo de Trinity, un grupo del Laboratorio de Los Alamos levanta hasta la plataforma la bomba montada.



3. REUNION DE CIENTIFICOS atómicos en una base de las islas Marianas, donde se montaron las bombas atómicas que se arrojaron sobre Japón en agosto de 1945. El autor, sentado, es el tercero por la derecha.

PHILIP MORRISON en el Laboratorio de Los Alamos en 1945.

poco antes del amanecer; nuestro sol artificial se elevó sobre la tierra para luego desvanecerse. Para la mayoría de los 2000 técnicos de Los Alamos —civiles, militares y estudiantes soldados—, esa prueba coronaba el trabajo de todos. El terrorífico despliegue que seguiría antes de un mes se tornó en el anticlímax de esa sensación, fuera de nuestro control, muy distante. La advertencia explícita que yo había esperado no se produjo; la transformación nuclear del arte de la guerra se mantuvo en secreto hasta que la lluvia de fuego que arrasó Hiroshima la reveló.

La guerra nuclear en embrión

Las tres bombas de 1945 —la de prueba y las dos que se arrojaron en Japón— fueron, más que armas seguras y fiables, piezas casi improvisadas de un equipo complejo de laboratorio. Muy poco después del ensayo de julio, alrededor de un sesenta por ciento de nosotros volamos de Los Alamos al Pacífico norte para ayudar a montar las bombas y sumar nuestra capacidad insustituible a la desplegada por miles y miles de hombres de la aviación en Tinian, donde un sinfín de cargamentos de gasolina y de bombas incendiarias entraba en el puerto.

La bomba de Hiroshima, la primera que estuvo lista, se lanzó el 6 de agosto de 1945. "Little Boy" (Chiquillo) era de uranio. Convirtió la ciudad en una ruina herrumbrosa. Ni siquiera se había ensayado antes por su diseño elemental, de tipo cañón, mucho más costoso sin embargo en combustible nuclear. Vino a continuación la segunda versión de la recién ensayada bomba de implosión de plutonio, "Fat Man" (Gordo), que sembró el desastre en Nagasaki. La guerra acabó enseguida.

Con la impresión de que completaba así el haber sido testigo, durante tanto tiempo, de toda la tragedia, acepté formar parte de la avanzadilla que partió desde nuestra base en el Pacífico para entrar en Japón el primer día de la ocupación norteamericana. Junto con otros dos jóvenes, viajé por tren un par de semanas a través del país, abarrotadas las vías por las tropas desmovilizadas. Los japoneses estaban desastrosamente empobrecidos y hambrientos, pero mantenían el orden. A lo largo del camino vimos ciudades grandes y pequeñas arrasadas por cien incendios salvajes, prendidos por raids de hasta mil bombarderos B-29, devastación que era la marca misma de la vieja guerra. El daño sufrido por estas ciudades recordaba la destrucción que dejaron en Hiroshima una sola explosión nuclear y el fuego que la siguió.

Habíamos traído al mundo un nuevo tipo de guerra, la guerra nuclear en embrión, con sólo dos bombas. Un solo bombardero podía ahora aniquilar una ciudad de un tamaño apreciable y matar a centenares de miles. Pero en tierra, allí entre todos los que sufrían y murieron cruelmente, no eran tan diferentes el viejo fuego y el nuevo. Uno y otro habían desatado un infierno inimaginable. Era verdad que habíamos visto cientos de personas en el andén de Hiroshima, la mayoría de las cuales morirían de las quemaduras o de la nueva epidemia, la enfermedad de la radiación, que habíamos inoculado. Pero muchas otras ciudades, entre ellas Tokyo, donde en el primer raid incendiario habían muerto cien mil personas o más, contaban también con legiones de supervivientes quemados y lacerados. La radiación no es un asunto menor, pero la diferencia entre los raids masivos que sufrieron las ciudades japonesas y esos dos ataques nucleares estribaba menos en la escala de la tragedia humana que en el hecho escalofriante de que aho-

ra era mucho más fácil destruir las populosas ciudades de la humanidad. Dos bombas nucleares habían quizá duplicado la cuenta de muertos en Japón debida al poder aéreo.

La fisión y luego la fusión ofrecían desolación al por mayor a un precio barato. No sería la segunda guerra mundial la verdaderamente transformada por el núcleo del átomo, sino la gran guerra que la siguiese. Los últimos cincuenta años han estado regidos por una sola verdad nuclear. En 1945, los Estados Unidos desplegaron unos mil bombarderos de gran alcance B-29. En los años sesenta poseían 2000 bombarderos a reacción, y en los ochenta quizá 1500 misiles. Durante más de cuatro décadas han mantenido una fuerza de ataque similar a la que comandó el general Curtis E. LeMay en 1945, cada año más veloz, más fiable, mejor en cada aspecto. Pero ahora no es química *cada carga explosiva*, sino nuclear, portadora de una muerte y una destrucción decenas, hasta cientos de veces mayores. Los gobernantes de ambos lados decidieron armarse hasta los dientes, y hasta enarbolar la amenaza de la guerra, con este tipo de arsenal, una guerra que sería varios órdenes de magnitud más violenta que todas las precedentes. Pero los gobernantes no llevaron adelante sus amenazas; hoy se considera el conflicto nuclear a gran escala por lo que realmente es, absolutamente intolerable.

Volví del Japón a finales de septiembre de 1945. Me enteré de que uno de mis compañeros de Berkeley había perecido; le había matado en el laboratorio una erupción incontrolada de radiación. (No sería el último.) Lo temerarios que habíamos sido con el dragón nuclear dejó también su huella en Nuevo México. América estaba en paz, pero era un clamor, y el centro del interés, con todo su terror, la nueva bomba atómica. A finales de ese año muchos científicos, yo entre ellos, se pronunciaron con contundente y pública claridad, con dramatismo incluso, sobre los peligros de la guerra nuclear.

Este fue nuestro mensaje: el secreto no nos defenderá, pues átomos y saberes los hay en todas partes. No es probable que haya defensa alguna que contrarreste la enorme energía que se desprende; nunca será factible en la práctica interceptar cada una de las bombas, y basta un puñado para causar gravísimos desastres. El refugio pasivo sirve de poco, pues cuanto más profundo sea el refugio carísimo, mayor será la bomba barata. No habrá tampoco margen probable de superioridad técnica que nos salvaguarde, pues hasta la menor fuerza nuclear puede ocasionar daños intolerables.

La herencia de la bomba

Creo que estas opiniones no han perdido un ápice de validez en los últimos cincuenta años. Sólo queda una salida: acuerdos mundiales que pongan fin a la guerra nuclear, redactados con exigencia hasta en el menor detalle. Es sorprendente que los jefes de laboratorio del proyecto Manhattan dijesen casi lo mismo muy pronto, ya el 17 de agosto de 1945, tres días después de que se firmase la rendición del Japón. Pero eran cartas reservadas al secretario de la guerra de los Estados Unidos, y estas primeras opiniones permanecieron ocultas durante mucho tiempo.

Los años noventa nos han dado una oportunidad histórica inesperada, como inesperada fue la propia fisión. Los Estados Unidos y la que fuera Unión Soviética aciertan ahora al desmantelar unas ocho o diez cabezas nucleares al día, pero han de recorrer aún un largo camino. Nunca habíamos tenido un presagio de paz tan prometedor, tan palpable, pero continúa siendo de momento eso, mera promesa. Necesitamos actos resueltos y generalizados. La tarea no es sencilla. Pero, ¿existe objetivo internacional más importante que poner el futuro a salvo de la guerra nuclear? ¿Cómo es posible que hayamos planificado alguna vez la guerra con decenas de miles cabezas nucleares? ¿No sabíamos que también Occidente quedaría arrasado? Con las armas nucleares, la guerra llega a la simetría final, estéril, de la destrucción mutua.

En 1963, Oppenheimer recordó que la primera vez que Bohr fue a Los Alamos durante la guerra, le preguntó a su amigo y anfitrión, en tono muy grave: "¿Es lo bastante grande?" Oppenheimer sabía qué quería decir: Esta nueva escala de la guerra, ¿es lo bastante grande para poner en entredicho la institución misma de la guerra? "No sé si entonces lo era", escribió Oppenheimer, "pero al final ha llegado a serlo." Y luego se volvió demasiado grande, pavorosamente grande; no obstante, llegó el momento en que, al menos, dejó de crecer con exuberancia. Podremos, si no cejamos, acabar con su amenaza sin igual.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE LETTERS OF J. ROBERT OPPENHEIMER. Charles Weiner y Alice Kimball Smith. Harvard University Press, 1981.

A HISTORY OF STRATEGIC BOMBING. Lee B. Kennett. Charles Scribners' Sons, 1982.

THE MAKING OF THE ATOMIC BOMB. Richard Rhodes. Simon & Schuster, 1986.



4. HIROSHIMA fue arrasada el 6 de agosto de 1945 por la primera bomba nuclear arrojada en la guerra.

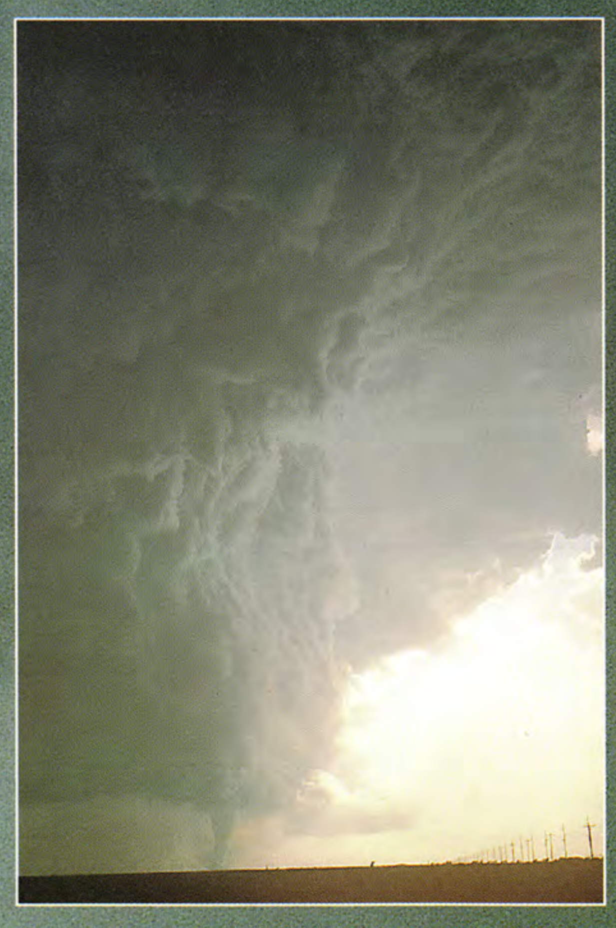
Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Tornados

Mucho se ha avanzado en el conocimiento de las tormentas capaces de desencadenar tornados, pero no se han despejado todas las incógnitas sobre la formación de esos vórtices violentos

Robert Davies-Jones

La primavera última fue prolífica en tornados. Lo recuerdan muy bien los norteamericanos. Sólo en mayo, unos 484 episodios mataron a 16 personas y produjeron daños materiales por valor de millones de dólares. Para los científicos había también en ello un aspecto positivo. Día tras día, la predicción de tormentas violentas nos sacaba del Laboratorio Nacional de Tormentas Violentas (NSSL) de Norman, Oklahoma, para acudir presurosos a los estados de Texas o Kansas. Algunas veces regresábamos entrada la madrugada. Tras el análisis diario de la situación a las nueve de la mañana, nos encaminábamos de nuevo hacia esas zonas, cansados, sí, pero con la esperanza, una vez más, de recoger preciosos datos sobre la formación de los tornados.



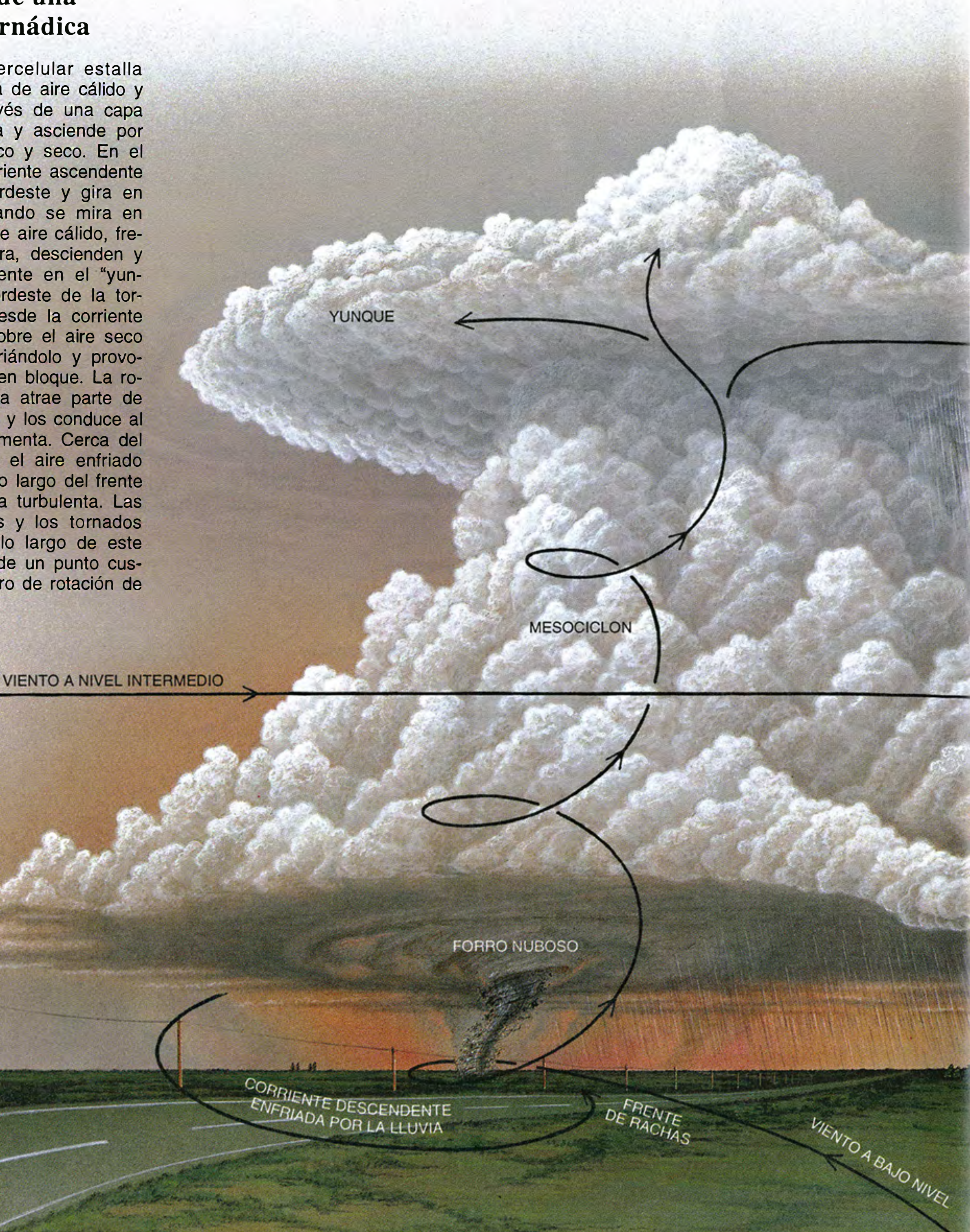
1. CONTACTO CON EL SUELO DE UN TORNADO (*fotografía de doble página*) el 12 de abril de 1991 en el norte de Oklahoma. Dejó un rastro de destrucción de 800 metros de ancho. El 31 de mayo de 1990, en el Rabo de la Sartén de Texas, un tornado de una serie de ellos (encima) emergió de una tormenta altamente organizada. El tornado demolió varias estructuras en un pasillo de 1600 metros de anchura.

El jueves 16 de mayo, los mapas meteorológicos indicaban riesgo de tornados vespertinos en Kansas. Hacia las cinco de la tarde había estallado una amenazadora tormenta, alimentada por vientos cálidos y húmedos del sur que se elevaban y entraban en rotación al formar una corriente ascendente. La tormenta era una "supercélula" muy organizada, condición ideal para el nacimiento de los tornados. Cuando William Gagan, doctorando de la Universidad de Oklahoma, y el autor se acercaron desde el sureste con un vehículo pertrechado con el equipo instrumental adecuado, el "Probe I", vislumbraron la cima de una tormenta monstruosa, a 16 kilómetros de altura y 95 de distancia. La tormenta avanzaba en dirección este-nordeste a casi 50 kilómetros por hora, movimiento típico en las Grandes Llanuras.

Tomamos la autopista federal. Al aproximarnos hasta 15 kilómetros, vimos por primera vez la base, larga y oscura, de la nube. Unos kilómetros más allá, observamos la manga de un tornado, en forma de trompa de elefante, que pendía de la parte posterior de la torre nubosa principal, cerca de Garden City. En nuestro afán por acercarnos más, maniobramos por carreteras secundarias. Lo perdimos de vista. Pero volvimos a localizarlo a unos cinco kilómetros al noroeste de nuestra posición. Era delgado y colgaba horizontalmente detrás de la nube madre, hasta que de repente se dobló para formar un ángulo recto con el suelo. Sin la menor duda, lo estaba separando de la nube el aire frío que descendía del interior de la tormenta y se acercaba al final de su vida.

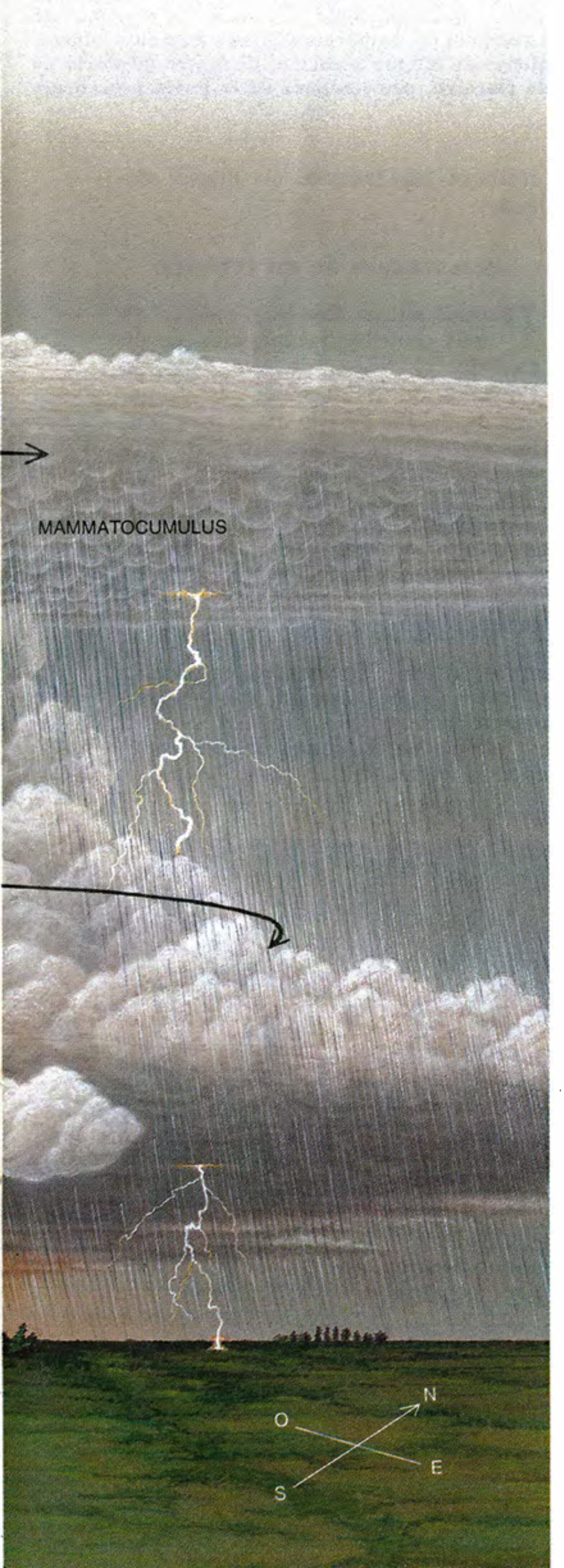
Anatomía de una tormenta tornádica

Una tormenta supercelular estalla cuando una masa de aire cálido y húmedo penetra a través de una capa estable situada encima y asciende por el interior de aire fresco y seco. En el hemisferio norte, la corriente ascendente se inclina hacia el nordeste y gira en sentido antihorario cuando se mira en planta. Las partículas de aire cálido, frenadas en la estratosfera, descienden y se extienden lateralmente en el "yunque". En la porción nordeste de la tormenta, la lluvia cae desde la corriente ascendente inclinada sobre el aire seco a nivel intermedio, enfriándolo y provocando su precipitación en bloque. La rotación de la supercélula atrae parte de la lluvia y el aire fresco y los conduce al lado suroeste de la tormenta. Cerca del suelo, el aire cálido y el aire enfriado por la lluvia chocan a lo largo del frente de rachas, una frontera turbulenta. Las nubes forro muy bajas y los tornados tienden a formarse a lo largo de este frente, en la vecindad de un punto cuspidal que indica el centro de rotación de la tormenta.



Supercélulas

La mayoría de los tornados dejan rastros de unos 50 metros de ancho de su poder devastador, avanzan a unos 50 kilómetros por hora y duran sólo unos minutos. Los extremadamente destructores pueden tener kilómetro y medio de ancho, alcanzar velocidades entre 90 y 100 kilómetros por hora y estar en contacto con el suelo durante más de una hora. Los tornados del hemisferio norte, los mismos que arrasan zonas de Estados Unidos, nordeste de la India y Bangladesh, casi siempre giran en sentido antihorario vistos desde arriba. Los tornados del hemisferio sur, así los australianos, tienden a girar en sentido horario. Tales sentidos de giro se llaman ciclónicos.



En 1949, Edward M. Brooks, de la Universidad de San Luis, descubrió, examinando las variaciones de la presión atmosférica en las estaciones meteorológicas próximas a los tornados, que estos vórtices suelen formarse en el seno de los mesociclones, masas mayores de aire en rotación. En 1953 apareció un mesociclón en una pantalla de radar en Urbana, Illinois, que dibujaba un apéndice ganchudo en la parte suroeste del eco que la tormenta producía en el radar. Como la lluvia refleja las microondas emitidas por el radar, la forma de gancho indicaba que la lluvia era arrastrada, en cortina, en giro ciclónico. Y en 1957, T. Theodore Fujita, de la Universidad de Chicago, examinó fotografías y películas de cine tomadas por residentes en la zona de la base y bordes de una tormenta tornádica en Dakota del Norte, y halló que la totalidad de la torre nubosa giraba ciclónicamente.

Ya en los años sesenta, Keith A. Browning, meteorólogo británico de visita en el Proyecto Nacional de Tormentas Violentas, ente precursor del NSSL, reconstruyó con datos de radar un cuadro bastante exacto de las tormentas tornádicas. Advirtió así que la mayoría de los tornados se originaban en el interior de tormentas de particular magnitud y violencia, a las que llamó supercélulas. Estos potentes sistemas se desarrollan en entornos hidrostáticamente muy inestables; en ellos, los vientos varían claramente con la altura y hay aire frío y seco encima del aire cálido y húmedo, de 1,5 kilómetros de espesor, que descansa sobre la superficie de la Tierra. Una delgada capa estable separa las dos masas de aire e impide que se desencadene la inestabilidad hidrostática.

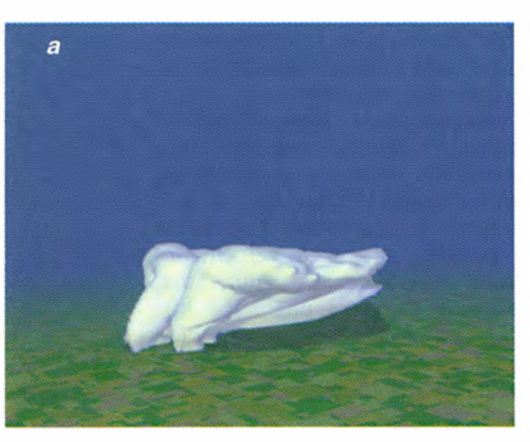
Esta tapadera se puede abrir si el aire a bajo nivel se calienta por la acción solar o si se produce la invasión por parte de un sistema generador de mal tiempo. Los frentes, las corrientes en chorro y las perturbaciones a alto nivel, visitantes habituales de las Grandes Llanuras durante la estación de tornados, pueden forzar hacia arriba el aire a bajo nivel. Como la presión atmosférica disminuye con la altura, las partículas de aire en ascenso se expanden y enfrían. A suficiente altura se enfrían lo bastante para que su vapor de agua comience a condensarse en gotículas neblinosas, formando la base plana de una nube.

Al condensarse, el vapor libera calor latente, calentando las partículas de aire. Estas alcanzan un punto en que están más calientes que el aire circundante y ascienden libremente hasta grandes alturas a velocidades de hasta 250 kilómetros por hora, formando la torre de una nube tormentosa. La cizalladura, o variación de la dirección del viento con la altura, inclina la corriente ascendente hacia el nordeste.

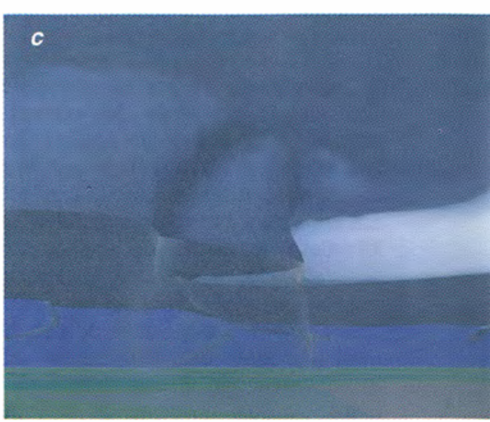
A medida que ascienden, las gotículas se sueldan y crean gotas de lluvia. La fuerza ascensional de las partículas de aire queda parcialmente compensada por el peso del agua y hielo propios. Las partículas pierden impulso en la estratosfera, descienden hasta unos 13 kilómetros y se mueven horizontalmente hacia fuera, formando el "yunque" de la tormenta. La lluvia que cae de la corriente ascendente inclinada se evapora en el seno del aire seco a nivel intermedio, en el borde nordeste de la supercélula; provocan así que este aire se enfríe y descienda hacia el suelo. Con el tiempo, la rotación de la tormenta va empujando, alrededor de la corriente ascendente, la lluvia y la corriente descendente. El aire fresco tiene una humedad relativa más alta que el aire cálido; si se le obliga a ascender, crea nubes a menor altura. Así, cuando la corriente ascensional aspira parte de este aire, se origina una base nubosa más baja y oscura, el llamado forro de la base.

En contraste con la mayoría de las tormentas, que contienen varias corrientes ascendentes y descendentes que se interfieren entre sí, las supercélulas constan de una o dos células, cada una con su corriente descendente que coexiste con la amplia corriente ascendente giratoria. El alto nivel de organización permite que una supercélula viva durante largo tiempo en un régimen intenso y casi

ROBERT DAVIES-JONES estudia la dinámica y génesis de los tornados en el Laboratorio Nacional de Tormentas Violentas (NSSL) de Norman. Enseña meteorología en la Universidad de Oklahoma. Tras licenciarse en física por la Universidad inglesa de Birmingham, se concentró en los fenómenos de convección solar en la Universidad de Colorado, donde obtuvo en 1960 el doctorado en astrogeofísica. Un año más tarde ingresó en el NSSL, aplicando esta vez sus conocimientos de dinámica de fluidos al tiempo atmosférico. Codirige el *Journal of the Atmospheric Sciences.*







2. SIMULACION MEDIANTE ORDENADOR de una supercélula, que da vida a un tornado, débil y ancho. Se basa en la solución d las ecuaciones hidrodinámicas para el agua y el aire en una malla tridimensional de puntos que representa el espacio. Al comenzar tormenta (*a*; *43 minutos después del comienzo de la simulación*) y evolucionar (*b*; *101 minutos*) la malla (invisible) se amplía median retículas de puntos de finura creciente, de hasta 0,1 kilómetros de separación, en regiones de intensa rotación. El centro giratorio d la tormenta queda evidenciado en una vista desde abajo (*c*; *103 minutos*). Por mor de claridad, prescindimos de la lluvia proceden

estacionario que conduce a la formación de tornados. Una región de ascendencia de 1,5 a 5 kilómetros de radio puede comenzar a girar con vientos de 65 kilómetros por hora o más, creando un mesociclón. La tormenta puede entonces desarrollar rotación a bajo nivel e incluso un tornado, generalmente en el borde suroeste de la corriente ascendente y cerca de la descendente adyacente, mientras el mesociclón está en su fase madura o comienza a debilitarse.

Por último, el mesociclón muere envuelto en una cortina de lluvia cuando, cerca de la superficie terrestre, su corriente ascendente es interceptada por el aire muy frío que sale de la parte central de la corriente descendente. En las supercélulas persistentes, se puede haber formado ya un nuevo mesociclón a algunos kilómetros al suroeste del que está muriendo, a lo largo del frente de rachas o frontera entre el aire cálido y el fresco. Puede desarrollarse rápidamente un nuevo tornado.

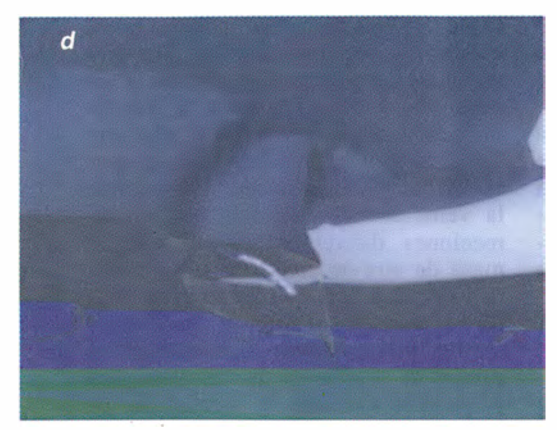
Persecución de un tornado

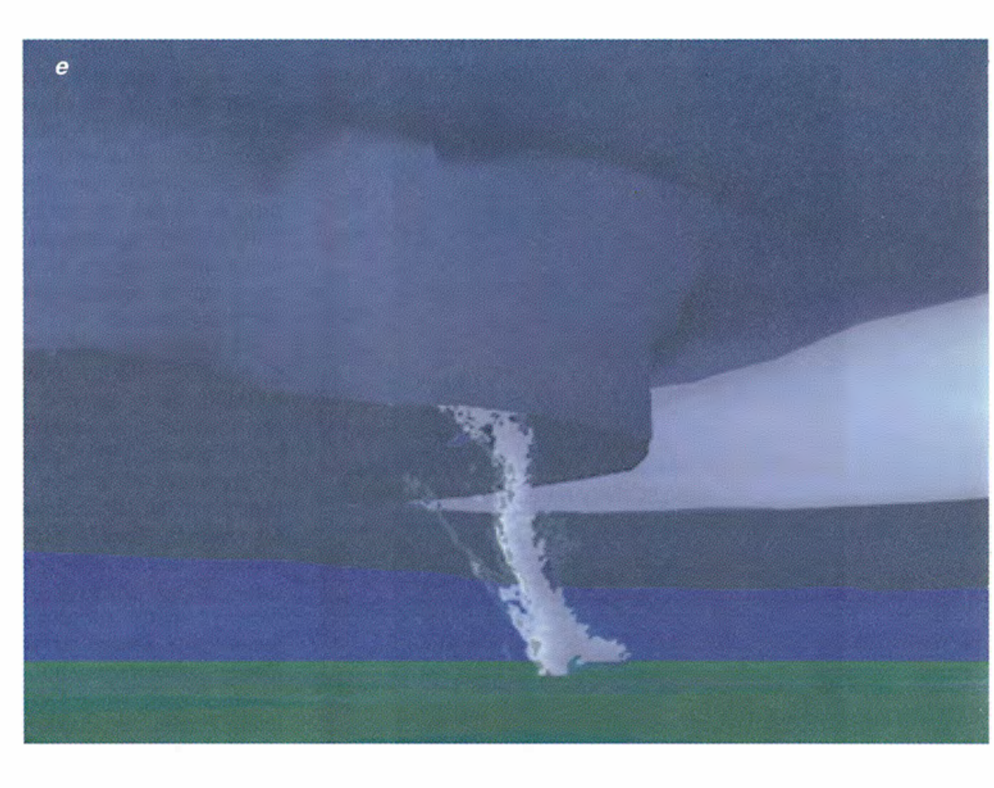
Para localizar dónde y cuándo es más probable la aparición de un tornado, el NSSL llevó a cabo un Proyecto de Intercepción de Tornados desde 1972 hasta 1986. Los grupos interceptadores empezaron por obtener metrajes de películas para medir las velocidades extremas del

Potencia destructora

Los destrozos que los tornados producen en los edificios, sirva de muestra la casa texana de la fotografía, y las distancias a que pueden transportar objetos pesados revelan las extremas velocidades del viento que se alcanzan en la proximidad del suelo. En los años setenta, el Instituto de Investigación de Desastres de Lubbock, Texas, llegó a la conclusión de que los peores daños documentados requerían velocidades del viento de hasta 450 kilómetros por hora. Los ingenieros también observaron que las paredes de los edificios situadas a barlovento, generalmente hacia el suroeste, casi siempre caían hacia dentro; de ello se infería que, en la mayoría de los casos, las estructuras son destrozadas por la fuerza bruta del viento y no por un brusco descenso de la presión atmosférica. Por consiguiente, se dejó de aconsejar a los residentes en el "Callejón de los Tornados", en el medio oeste de los EE.UU., que abrieran las ventanas para reducir la presión en el interior. Por culpa de esa medida errónea, en efecto, muchas personas habían recibido cortes por vidrios lanzados desde las ventanas cuando corrían a abrirlas. También se dejó de aconsejar a los residentes que se escondieran en la esquina suroeste de la casa: aquí es donde corrían mayor peligro de que las paredes se derrumbaran sobre ellos. Ahora se aconseja buscar refugio en un cuarto central cerrado, porque allí tienen la protección adicional de las paredes interiores.







de las nubes negras; además, se ha convertido en transparente un denso forro nuboso que llega hasta el suelo. Un vórtice blanco se inicia a gran altura en las nubes (*d*; *104 minutos*) y rápidamente alcanza el suelo (*e*; *107 minutos*).

viento, que aportaron el "contraste en tierra" de las observaciones de radar. Se cosecharon otros beneficios adicionales. Los "cazadores" observaron que, con frecuencia, los tornados se desarrollaban en partes de una tormenta libres de lluvia y relámpagos; se desecharon así las hipótesis que apelaban a esos estímulos para desencadenar los tornados. Y en 1975 se registró un episodio rarísimo: un tornado anticiclónico. Su rotación, opuesta a la de la Tierra, no se limitaba a intensificar la del giro del planeta.

Durante las dos últimas primaveras, el NSSL ha patrocinado otro proyecto, el de comprobación de los orígenes de la rotación en el experimento de tornados (VORTEX, del título inglés *Verification of the Origins of Rotation in Tornadoes Experiment*). Una flotilla entera de vehículos está preparada para realizar mediciones del interior y de la vecindad de las supercélulas. Una de las furgonetas va pilotada por el coordinador de campo, Erik N. Rassmussen, del NSSL, que trabaja con los meteorólogos de la oficina central en Norman para elegir la tormenta blanco y poner orden en la recogida de datos. Hay cinco furgonetas equipadas para obtener radiosondeos en el interior y en las cercanías de las tormentas; otras 12 portan estaciones meteorológicas montadas en el techo, aparatos que se elevan 10 metros por encima del suelo. Los datos se almacenan y procesan en ordenadores portátiles de la cabina.

De la última docena, una se encarga de obtener metraje de película para el análisis de los tornados; otras dos despliegan nueve "tortugas". Llamadas así por su semejanza con los quelonios marinos, las "tortugas" son paquetes de instrumentos, de unos 18 kilogramos de peso, construidos para resistir los embates de un tornado. Tienen sensores bien protegidos para medir la temperatura y la presión. Se colocan en el suelo, delante de los tornados, a intervalos de 90 metros.

Las nueve furgonetas restantes son las "sondas" (*probes*, en inglés), cuya misión estriba en acopiar datos meteorológicos en regiones predeterminadas de la tormenta. Probe 1 se encarga de medir gradientes de temperatura en la proximidad y al norte del tornado o mesociclón, región de fuertes y frecuentes granizadas. Por dos veces en la primavera de este año, granizo del tamaño de una pelota de tenis ha hecho añicos el parabrisas de Probe 1.

Aquel jueves en Kansas, mientras el tornado se disipaba, corríamos hacia el este para presentarnos delante de la tormenta, a la caza de un nuevo mesociclón. Mientras esquivábamos los baches encharcados en aquellos caminos de carro, pudimos ver dos filas de hasta ocho postes de alta tensión tumbados en el campo y segados a medio metro del suelo. Debió haber pasado un fuerte tornado oculto en la lluvia al nordeste de nuestra posición. (Al día siguiente, leí en los periódicos que se habían derribado 150 postes.)

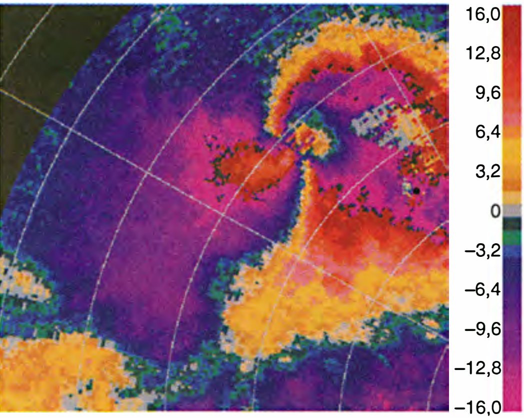
Unos 50 kilómetros más al este, divisamos el forro, una nube baja y oscura, en rotación; era un a modo de pedestal que descendía de la base principal de la nube. Apareció un tornado muy fino; no emergía de la base oscura, lo habitual, sino de una base nubosa adyacente más alta. Este vórtice, tras besar el suelo, levantó restos de objetos, pero vivió los breves minutos de su existencia siendo un embudo nuboso en altura, sin señales visibles de contacto con el suelo.

Al nordeste se desarrolló otro nuevo forro, que se hizo ominosamente grande y bajo. Sin embargo, no llegó a producir tornado alguno. Cerca de Jetmore se desarrolló una nueva tormenta al sur de la que estábamos siguiendo. Nos dirigimos hacia el norte para corroborar que esta tormenta, más vieja, estaba perdiendo su capacidad generatriz de tornados. Volvimos después sobre nuestros pasos, para caer al sur de otra nueva tormenta.

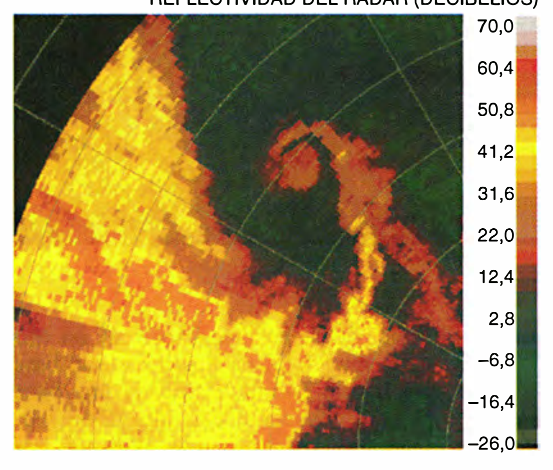
El sello de un vórtice

Además de la flotilla mencionada, VORTEX cuenta también con dos aviones que vuelan en torno a la tormenta y tres vehículos más. Todos ellos están equipados con radar Doppler, instrumentos que proporcionan información vital sobre las corrientes de aire en las tormentas tornádicas. El más moderno y portátil radar Doppler, construido este año por Joshua Wurman y Jerry M. Straka, de la Universidad de Oklahoma, ha suministrado ya detalles sin precedentes acerca de los tornados.

Para medir a distancia la velocidad







3. LA FIRMA O SELLO de un tornado puede detectarse por radar Doppler hasta veinte minutos antes de que pise el suelo. Si los vientos del interior de las nubes cambian bruscamente a lo largo de un trecho muy corto, habrá posiblemente un vórtice potencial o real, como en el caso del tornado (*arriba*) de Hanston, Kansas, observado por el autor el 16 de mayo. Un mesociclón, donde suelen hallarse inmersos los tornados, aparece en el radar corriente como un apéndice en forma de gancho hacia el lado suroeste de la tormenta. El rizo del gancho del radar (*abajo*) de la tormenta de Hanston revela también la presencia del tornado.

del viento, los radares Doppler meteorológicos emiten destellos de radiación en microondas y reciben después la reflexión de los mismos en un grupo de gotas de lluvia o partículas de hielo. Si las gotas avanzan hacia el radar, el destello reflejado tiene una longitud de onda más corta, que denuncia esta componente de la velocidad de las gotas. (La policía de tráfico usa instrumentos similares para detectar los vehículos que contravienen las indicaciones de limitación de velocidad.)

Las primeras mediciones Doppler de 1971 confirmaron que los vientos del interior de un "gancho" están en rotación, a velocidades de unos 80 kilómetros por hora. Esta circulación, observable primero a una altura de unos cinco kilómetros, va seguida de rotación a niveles mucho más bajos que preceden al desarrollo de un tornado vigoroso. En 1973, una pequeña anomalía en el mapa de velocidades Doppler de una tormenta tornádica en Union City, Oklahoma, resultó coincidir en el tiempo y en el espacio con un violento tornado.

El radar no podía "ver" o resolver directamente el tornado, pero mostró fuertes vientos que cambiaban bruscamente de dirección al atravesar el vórtice y su precursor en el interior de las nubes. Este sello del vórtice suele aparecer a unos 2700 metros, entre diez y veinte minutos antes de que llegue al suelo. Puede extenderse no sólo hacia abajo, sino también hacia arriba, alcanzando en ocasiones hasta 11 kilómetros de altura para grandes tornados.

Aunque el sello del tornado puede servir para alertar al público que busque refugio en un sótano o en un cuarto interior, sólo puede observarse cuando el meteoro está bastante cerca, a menos de 95 kilómetros. A distancias mayores, de hasta 250 kilómetros, los avisos de su inminencia pueden fundarse en la detección radárica del mesociclón progenitor. Los organismos federales están instalando una red de radares Doppler en toda la superficie de la Unión para mejorar el servicio de protección civil.

En 1991, Howard B. Bluestein, de la Universidad de Oklahoma, se sirvió de un radar Doppler portátil para medir, en la proximidad de un tornado violento en Red Rock, velocidades del viento de hasta 450 kilómetros por hora. Aunque altas, estas velocidades distan mucho de los 800 kilómetros por hora postulados hace 40 años para explicar hechos tan sorprendentes como el hallar palitos de paja clavados en la corteza de los árboles. (A tenor de la interpretación más plausible de este fenómeno, el viento fuerza la separación de las granulaciones de la madera, que después se cierran bruscamente, dejando aprisionada la paja.)

Basta un solo radar Doppler para avisos locales. Pero la investigación logra un cuadro más coherente si existe un segundo equipo Doppler que esté situado a una distancia de entre 40 y 55 kilómetros y vea la tormenta desde un ángulo distinto. Tal sistema Doppler doble, usado por el NSSL y otros desde 1974, mide la velocidad de la lluvia en dos direcciones diferentes. Puesto que la masa de aire se conserva, y conocida la velocidad con que está cayendo la lluvia respecto al aire en movimiento, los meteorólogos reconstruyen el campo de viento en tres dimensiones y pueden calcular la vorticidad (o rotación local del aire) y otros parámetros. Con tales datos se ha llegado al descubrimiento de que el tornado se encuentra a un lado de su corriente ascensional progenitora, cerca de una corriente descendente, y se ha comprobado que el aire que penetra en un mesociclón gira alrededor de la dirección de movimiento de éste.

Rotación

En 1978 se produjo un hallazgo de primera magnitud para desentrañar las complicadas rotaciones que se dan en las tormentas tornádicas. Robert Wilhelmson, de la Universidad de Illinois, y Joseph B. Klemp, del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), reprodujeron, en simulaciones por ordenador, supercélulas enteras de sorprendente realismo, con rasgos tales como las configuraciones de precipitación en gancho. Avanzando por pequeños intervalos de tiempo, ellos resolvieron numéricamente las ecuaciones que rigen la temperatura, la velocidad del viento y la conservación de la masa para el aire y el agua en sus diversas formas —vapor, gotículas de nube y gotas de lluvia— en una malla de puntos en tres dimensiones que remedaba el espacio.

En ese mundo simulado, al menos, los científicos mandaban. Incluso sin variación lateral alguna en el medio circundante inicial, lograron crear supercélulas, con lo que arruinaban la explicación popular que atribuye el origen del tornado al choque de masas de aire. Al "desconectar" la rotación terrestre, pusieron de manifiesto que ésta apenas influía durante las primeras horas de la vida de una tormenta. En cambio, la dirección del viento que a bajos niveles giraba en sentido horario con la altura resultaba crucial para el desarrollo de la rotación.

En el entorno de una supercélula típica, el viento en la proximidad del suelo sopla del sureste, a 0,8 kilómetros de altura el viento procede

del sur y, del suroeste, el viento a kilómetro y medio de altura. El viento cuya velocidad o dirección cambia con la altura produce rotación. Imaginemos de qué modo una varilla vertical empezaría a girar por acción del viento: si el procedente del sur sopla débilmente en la vecindad del suelo y con mayor velocidad más arriba, obligará a la varilla a girar alrededor de un eje dirigido de este a oeste.

Pero, ¿qué ocurre si el viento, en vez de variar su velocidad, cambia su dirección de sureste a suroeste? Supongamos que la varilla avanza hacia el norte, siguiendo la dirección del viento a nivel intermedio, a unos 800 metros. Entonces, su extremo superior es empujado hacia el este y su extremo inferior hacia el oeste, de modo que gira alrededor de un eje norte-sur. Por tanto, el aire está dotado de vorticidad según la corriente: gira en torno a su dirección de movimiento.

Las partículas de aire dotadas de vorticidad en el sentido de la corriente experimentan una inclinación hacia arriba de sus ejes de rotación cuando penetran en una corriente ascendente. Por tanto, la corriente ascendente, considerada en su conjunto, gira ciclónicamente. Propuesta en primer lugar por Browning en 1963 y demostrada analíticamente en los años ochenta por Douglas K. Lilly, de la Universidad de Oklahoma, y el autor, esta teoría explica la rotación de la corriente ascendente a niveles intermedios. Pero no explica cómo se desarrolla la rotación cerca del suelo. Como las simulaciones de Klemp y Richard Rotunno, del NCAR, mostraron en 1985, la rotación a bajo nivel depende de la corriente descendente de la supercélula, enfriada por la evaporación: no se produce cuando se "desconecta" la evaporación de la lluvia.

Hubo más. Las simulaciones revelaron que la rotación a bajo nivel se origina al norte del mesociclón, en aire moderadamente enfriado por la lluvia y subsidente (esto es, que desciende lentamente en bloque). A medida que la rotación a nivel intermedio obliga a la corriente descendente a girar ciclónicamente en torno a la corriente ascendente, parte del aire fresco de la corriente descendente se dirige hacia el sur, con aire cálido a su izquierda y aire mucho más frío a su derecha. El aire cálido, que posee fuerza ascensional, tira hacia arriba del lado izquierdo de las partículas, mientras que el aire frío las empuja por su lado izquierdo hacia abajo. En consecuencia, el aire fresco empieza a girar alrededor de su dirección de movimiento horizontal. Pero al descender, su eje de rotación se va inclinando hacia abajo, dando lugar a un giro anticiclónico.

Harold A. Brooks, también del NSSL, y el autor mostraron en 1993 que, mediante un mecanismo bastante complicado, la rotación en el seno del aire subsidente invierte su dirección antes de que el aire llegue a completar su descenso. Con el tiempo, este aire que gira ciclónicamente aparece a muy bajos niveles. Este aire moderadamente fresco fluye a lo largo de la superficie y es absorbido e incorporado en el costado suroeste de la corriente ascendente. Por ser convergente el flujo hacia la corriente ascendente, el aire gira más deprisa, de igual manera que una patinadora sobre hielo aumenta su velocidad de rotación pegando los brazos al cuerpo.

Pese a que ya sabemos cómo se desarrolla la rotación en gran escala a los niveles intermedios y bajos de un mesociclón, todavía nos falta identificar la razón por la que se forman los tornados. Según la explicación más elemental, son resultado del rozamiento con el suelo, una observación paradójica ya que el rozamiento suele frenar la velocidad del viento. Pero el efecto neto del rozamiento es muy parecido al de una taza de té removido con la cucharilla.

El arrastre reduce las velocidades y, por tanto, las fuerzas centrífugas en una delgada capa cerca de la parte inferior. Provoca que el líquido se mueva hacia dentro sobre el fondo de la taza, como lo demuestra el hecho de que las hojas de té se agrupen hacia el centro. Pero el fluido en la proximidad de la parte superior de esta corriente entrante gira más rápidamente conforme se va acercando al eje en virtud del efecto de la patinadora sobre hielo. El resultado es un vórtice a lo largo del eje de la taza. W. Stephen Lewellen, de la Universidad de Virginia Occidental, llega a la conclusión de que, en un tornado, los vientos más fuertes se alojan en los 100 metros inferiores.

El rozamiento explica también la persistencia de los tornados. Estos contienen un vacío parcial en su parte central; las fuerzas centrífugas impiden que el aire avance hacia dentro a través de las paredes del tornado. En 1969, Bruce R. Morton, de la Universidad Monash de Australia, explicó cómo sobrevive el vacío. Las intensas fuerzas de empuje de Arquímedes impiden que el aire penetre en

Un largo viaje

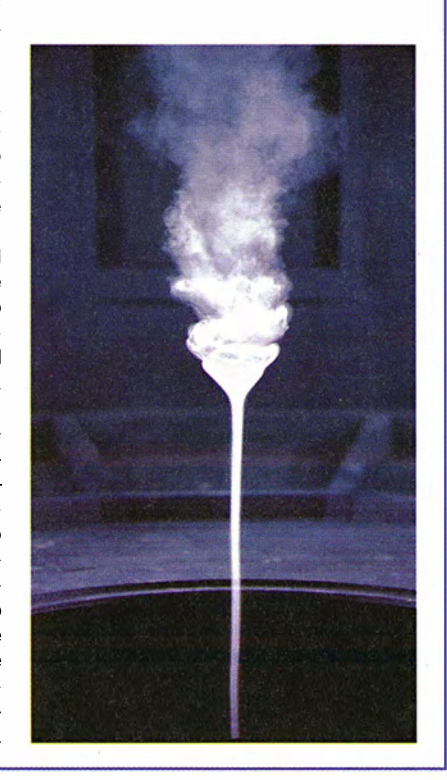
Esta fotografía recorrió 160 kilómetros transportada por un tornado de Ardmore, Oklahoma, en 1995. Pedazos de tejados y cubiertas y otros objetos pesados recorren muchas decenas de kilómetros; en 1985, un ala de avión voló 16 kilómetros. La mayoría de los restos caen a la izquierda de la trayectoria del tornado, frecuentemente en bandas bien definidas según el peso.

Los investigadores de la Universidad de Oklahoma recopilan las informaciones que les llegan sobre objetos dejados caer por los tornados para conocer las corrientes de aire en el interior de las tormentas. Los tornados parecen elevar algunos objetos a varios kilómetros de altura dentro de la tormenta principal. Los restos ligeros pueden retornar al suelo a 250 kilómetros de distancia. A modo de botón de muestra, hubo cheques cancelados en Wichita Falls, Texas, que aparecieron en Tulsa, Oklahoma; ocurrió en abril de 1979. Y, según cierto informe de 1953 recogido por los investigadores: "Emily McNutt, de South Weymouth, Massachusetts, halló un traje de novia en el patio trasero de su casa. Estaba sucio, como era de esperar, pero intacto y en estado sorprendentemente bueno. Una etiqueta cosida al traje rezaba 'McDonald, Worcester', lo que indicaba que el traje había sido transportado unos 80 kilómetros hasta el lugar de su aterrizaje final" (reproducido de *Tornado!*, por John M. O'Toole).

Los relatos sobre objetos transportados por tornados se pueden enviar por correo electrónico al Tornado Debris Project en debris@metgem.uoknor.edu

Tornado de mesa

Los experimentos de laboratorio han ayudado a explicar por qué los tornados pueden adquirir distintas configuraciones. En el aparato construido en los años sesenta por Neil B. Ward, del Laboratorio Nacional de Tormentas Violentas de Norman, Oklahoma, y refinado por John T. Snow y otros, de la Universidad Purdue, la presencia de una rejilla giratoria obliga al aire a entrar en rotación conforme va penetrando en un compartimiento más bajo. Fluye entonces hacia la cámara principal a través de un ancho orificio central, absorbido por los ventiladores extractores de la parte superior. El aparato ha reproducido muchas de las características de los tornados reales, tales como la distribución de presiones atmosféricas en la vecindad de la superficie inferior.



Reinterpretando los resultados de Ward, el autor halló en 1973 que la magnitud crucial para la formación de tornados es la relación de torbellino *S*, usada en primer lugar por W. Stephen Lewellen, de la Universidad de Virginia Occidental.

S es la relación entre la velocidad tangencial de la corriente ascendente en el borde del orificio (controlado por la rotación de la rejilla) y la velocidad ascensional media a través del orificio (determinada por el ventilador). Para *S* inferior a 0,1, no hay vórtice. A medida que *S* aumenta, aparece un vórtice que tiene un intenso chorro hacia arriba a bajos niveles (*derecha*). Para *S* mayor que 0,45, el vórtice se torna totalmente turbulento con una corriente descendente central rodeada por una fuerte ascendencia. Y a la relación de torbellino crítica de 0,1 se forman un par de vórtices en lados opuestos del vórtice progenitor. Para relaciones de torbellino todavía más altas, se han observado hasta seis vórtices subsidiarios.

la parte central del tornado a través de su cima. En la cercanía del suelo, el rozamiento reduce la velocidad tangencial y con ello las fuerzas centrífugas, permitiendo una entrada vigorosa, aunque de poco espesor, en la parte central. Pero el rozamiento también actúa limitando los vientos que penetran e impidiendo así que entre suficiente aire para llenar la parte central. Los tornados se intensifican y estabilizan después de haber realizado el contacto permanente con el suelo, porque sus corrientes hacia dentro quedan restringidas a una delgada capa fronteriza.

Contacto con el suelo

La teoría del rozamiento no explica, sin embargo, por qué el sello de un vórtice en las nubes anuncia a veces la entrada del tornado en contacto con el suelo con 10 o 20 minutos de antelación.

Muchas de las características clásicas de los tornados se pusieron de manifiesto inesperadamente ante nosotros aquel día de mayo en Kansas. Para cuando llegamos a la tormenta sur, en la pequeña ciudad de Hanston, estaba oscureciendo y empezaban a suspenderse las operaciones. Pero entonces el coordinador de campo dio aviso a los grupos de que en nuestra vecındad se encontraba una nube forro en rápida rotación. Al tiempo que comenzaron a sonar las sirenas de alarma, observamos un delgado tornado en serpentina alcanzar el suelo a cinco kilómetros al sureste de nuestra posición.

Salimos disparados hacia el norte para colocarnos delante del tornado, sin darnos cuenta, en nuestra excitación, de la existencia de una profunda vaguada de drenaje que atravesaba la calle. Dañó la dirección del vehículo e inclinó la estación meteorológica, pero continuamos adelante. Torcimos, entrando en un camino de carro, para dirigirnos hacia el este, al lado norte del tornado, que se había convertido ahora en una ancha manga de polvo cuya parte superior se ensanchaba en un embudo que descendía de la base de la nube. Cuando llegamos delante de nuestra "presa", se transformó en varios vórtices más pequeños, todos girando furiosamente alrededor del eje central del tornado. (En 1967, Fujita observó que algunos tornados dejaban atrás maizales desmochados en varios surcos yuxtapuestos. Neil B. Ward, del NSSL, atribuyó después esos rastros sintomáticos a tornados subsidiarios. Como un punto de la llanta de la rueda de una bicicleta que gira alrededor del eje mientras éste se mueve hacia delante, los frenéticos subvórtices describen trayectorias cicloidales.)

Escasos de gasolina, corríamos delante del tornado, preocupados porque no sabíamos si el camino acababa ni dónde. El tornado estaba a quizá kilómetro y medio de distancia y no se movía perceptiblemente a través de nuestro campo de visión, lo que indicaba que avanzaba directamente hacia nuestro encuentro a una velocidad de 50 kilómetros por hora. El coordinador de campo acudió a auxiliarnos informándonos de una carretera al norte, hacia Burdett, que tomamos con alivio. Paramos después de kilómetro y medio y vimos el tornado, que había estado tocando el suelo por lo menos a lo largo de 20 kilómetros y tenía ahora la apariencia clásica de un tubo de estufa, pasar al sur de nuestra posición y desaparecer en la oscuridad al este de donde nos hallábamos.

Regresamos como pudimos a casa, con nuestro vehículo averiado, nuestros datos inciertos y el pulso acelerado, confortados por las noticias de que se habían obtenido magníficos datos de radar desde el aire y con el nuevo radar de tierra portátil. Considerándolo retrospectivamente, deberíamos habernos mantenido junto al tornado a su misma marcha, en vez de adelantarlo, y convertirnos de perseguidores en perseguidos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EL TORNADO. John T. Snow, en *Investigación y Ciencia*, págs. 48-59; junio de 1984.

THUNDERSTORM MORPHOLOGY AND DYNAMICS. Segunda edición. Dirigido por Edwin Kessler. University of Oklahoma Press, 1986.

THE TORNADO: ITS STRUCTURE, DYNAMICS, PREDICTION, AND HAZARDS. Dirigido por C. Church, D. Burgess, C. Doswell y R. Davies-Jones, en *Geophysical Monograph* n.º 79. American Geophysical Union, 1993.

Así destruye el sida las defensas inmunitarias

De acuerdo con una hipótesis plausible, aquí razonada, la devastación del sistema inmunitario que lleva a cabo el sida surge de la evolución permanente del virus de la inmunodeficiencia humana en nuestro organismo

Martin A. Nowak y Andrew J. McMichael

La interrelación entre el virus de la inmunodeficiencia humana (VIH) y el sistema inmunitario ha resultado ser mucho más dinámica que lo que la mayoría de los expertos suponían. Las últimas investigaciones revelan que el VIH se replica de manera prodigiosa y que cada día que pasa son muchas las células del sistema inmunitario que se destruyen. Pero esta proliferación del virus queda controlada, de ordinario durante muchos años, por una respuesta defensiva vigorosa que impide una multiplicación más allá de ciertos límites. Por lo general, sin embargo, el equilibrio de fuerzas acaba inclinándose hacia el lado del VIH, provocando las graves alteraciones del sistema inmunitario que caracterizan el período de máximo apogeo de la enfermedad del sida.

Nosotros hemos propuesto una hipótesis evolutiva. No sólo explica la escapada final del virus de cualquier control inmunitario. Da cuenta también del prolongado período asintomático que transcurre entre la infección y la aparición de la enfermedad, así como de la duración de esa etapa silenciosa, que varía de forma considerable de un paciente a otro. En la mayoría de los individuos, el período asintomático dura unos diez años, mientras que en otros la enfermedad aparece ya al cabo de dos, y los hay que manifiestan los síntomas después de quince años.

En nuestra opinión, la poderosa respuesta inmunitaria, gracias a la cual muchos pacientes se mantienen en buen estado de salud largos años, termina por derrumbarse ante la incesante mutación del virus. Como veremos más adelante, pueden aparecer en un mismo individuo nuevas variantes del virus que logran evadir las fuerzas protectoras. Creemos que la acumulación de variantes labora en contra de la acción del sistema inmunitario hasta hacerle imposible sostener una lucha eficaz contra el virus.

Para entender cómo hemos llegado a esta hipótesis, que progresivamente está ganando respaldo clínico, conviene tener presentes algunas nociones sobre la erradicación de los virus por el sistema inmunitario y el comportamiento de éste ante el VIH en particular. Cuando un virus penetra en el organismo y coloniza sus células, las fuerzas defensoras lanzan un ataque de naturaleza plural, aunque dirigido con gran precisión hacia su objetivo. Los macrófagos, y células relacionadas, engullen partículas víricas libres y las degradan. A continuación, las células colocan ciertos fragmentos proteicos, o péptidos, en el interior de unos surcos presentes en las proteínas HLA ("antígenos leucocitarios humanos"). Las células trasladan luego estos complejos hasta su superficie, y allí los presentan a los linfocitos *T* coadyuvantes, un tipo de leucocitos.

MARTIN A. NOWAK y ANDREW J. McMICHAEL, adscritos a la Universidad de Oxford, colaboran en trabajos de investigación. Nowak está vinculado al departamento de zoología en el Colegio Keble. Se doctoró en la Universidad de Viena, donde estudió bioquímica y matemáticas. Aunque se dedica al estudio de las interacciones entre el VIH y el sistema inmunitario, ha desarrollado también numerosos modelos matemáticos aplicables en biología evolutiva. McMichael, que se sintió atraído por la ciencia después de leer los artículos que *Scientific American* publicó sobre el ADN en los años sesenta, enseña inmunología en la Universidad de Oxford. Es consultor de la empresa Celltech y miembro de la Regia Sociedad.

El organismo contraataca

Cada célula coadyuvante porta receptores preparados para reconocer un solo péptido, o epítope, presentado. Si encuentra el epítope adecuado sobre un macrófago u otra célula afín, la coadyuvante se une al péptido, se divide y comienza a segregar unas proteínas de tamaño pequeño. Estas proteínas ayudan a activar y promover la replicación de otros componentes del sistema inmunitario —especialmente linfocitos *T* citotóxicos, o asesinos, y linfocitos *B*.

Si se dan las circunstancias idóneas, las células *T* citotóxicas atacan directamente las células infectadas. Lo mismo que los macrófagos, las células infectadas rompen partículas víricas, algunos de cuyos fragmentos se combinan con moléculas de HLA; los complejos resultantes se muestran sobre la superficie celular. Si un linfocito *T* citotóxico reconoce, a través de sus receptores, un epítope expuesto sobre una célula enferma, se unirá al epítope y la destruirá antes de que ésta genere nuevos virus.

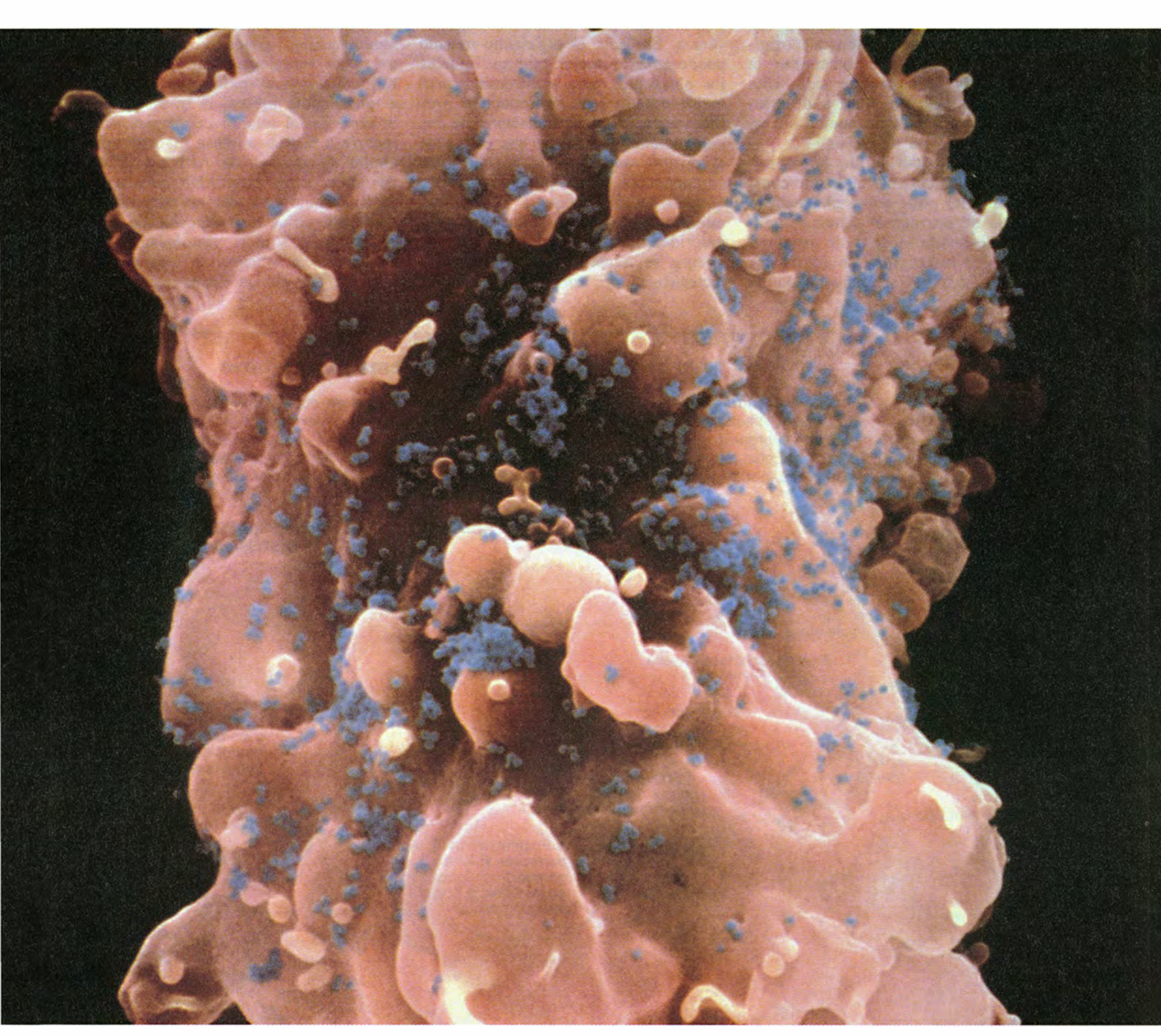
Los linfocitos *B* activados segregan anticuerpos que reconocen péptidos específicos de la superficie del virus. Los anticuerpos marcan así, para su destrucción, las partículas víricas libres, vale decir, las no secuestradas todavía en el interior celular.

Se supone que toda esta batería de repuestas interviene en la defensa contra el VIH. En el estadio inicial de la infección del VIH, el virus coloniza las células *T* coadyuvantes y los macrófagos. También se reproduce sin trabas durante un breve período. A medida que se va multiplicando la población vírica, decae el número de células coadyuvantes; los macrófagos mueren también, si bien los efectos ejercidos sobre éstos se hallan menos estudiados. Las células

T infectadas perecen, al tiempo que millares de nuevas partículas víricas emergen libres a través de la membrana celular. Ante esa nueva oleada, las células *T* citotóxicas y los linfocitos *B* no tardan en emprender una defensa enérgica y destruyen muchas partículas víricas y células infectadas por virus. A consecuencia de ello, se frena el crecimiento del virus y el organismo dispone así de una oportunidad para restablecer transitoriamente el suministro de células coadyuvantes hasta niveles casi normales.

Pero el virus no ceja. En su fase precoz, que puede prolongarse unas cuantas semanas, alrededor de un 30 por ciento de los pacientes infectados presentan algunos síntomas, a menudo fiebre que puede acompañarse de erupción e hinchazón de ganglios linfáticos. Con todo, incluso estos individuos suelen entrar en una etapa prolongada que se caracteriza por la ausencia de sintomatología.

A lo largo de esta segunda fase el sistema inmunitario continúa funcionando bien, y la concentración de virus mensurable permanece relativamente baja. Mas el nivel vírico se eleva gradualmente, en paralelo a un descenso de la población de células coadyuvantes. Datos cada vez más sólidos señalan que las coadyuvantes se pierden porque los virus y las células *T* citotóxicas las destruyen, no porque se halle minada la capacidad del organismo para producir nuevas células *T* coadyuvantes. Resulta una triste ironía el que las células asesinas, convocadas para controlar la infección del VIH, ataquen



1. DE LA SUPERFICIE DE UN LEUCOCITO INFECTADO emergen partículas de VIH (*esferas azules*), el virus causante del sida. Tales partículas víricas se hallan prestas para encaminarse hacia otras células e infectarlas. Aunque el sistema inmunitario del paciente infectado controla al principio esa dispersión, el virus acaba ganando la desigual partida.

también las células *T* coadyuvantes que necesitan para operar a pleno rendimiento.

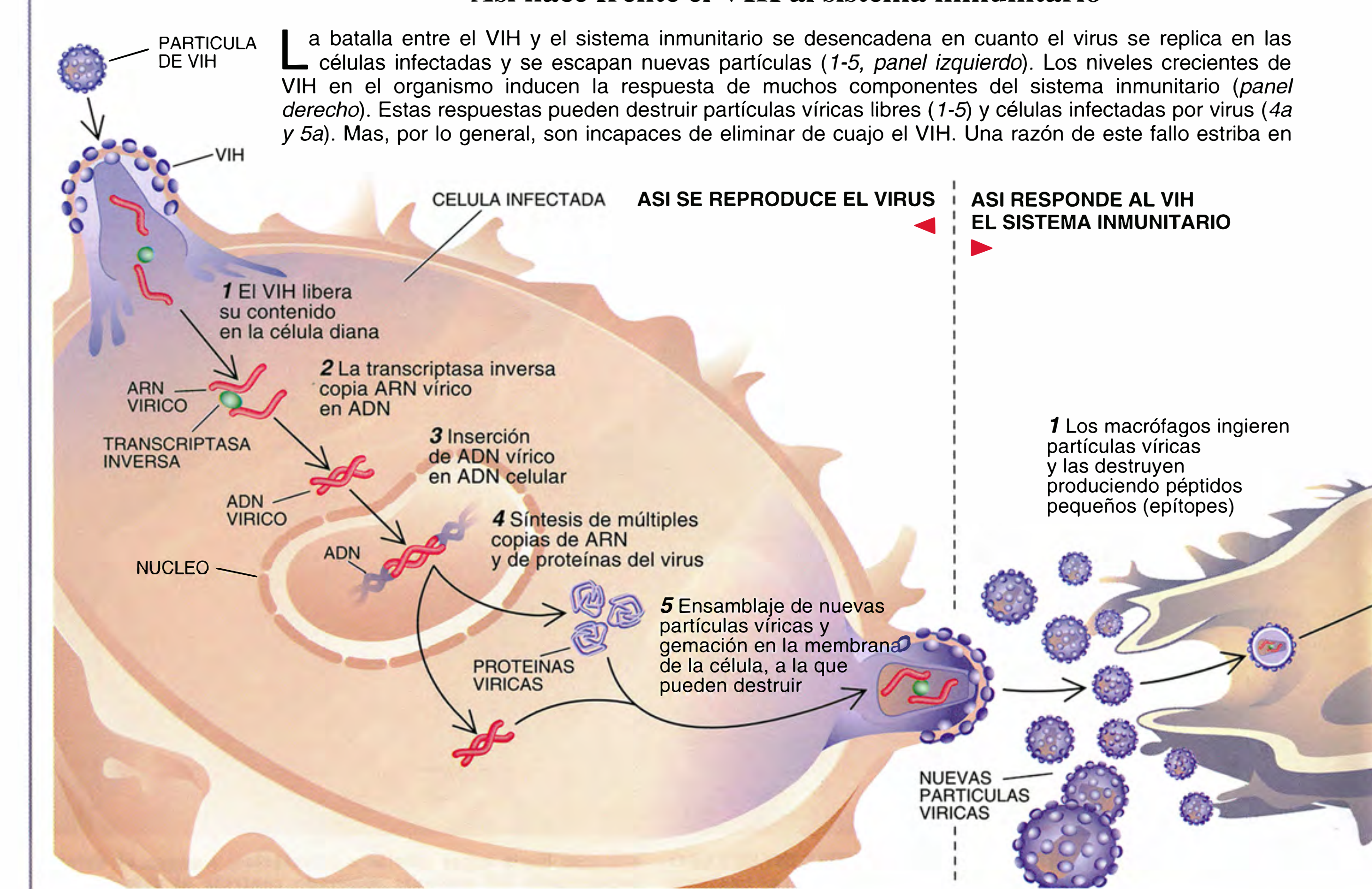
Suele afirmarse que los sidosos cruzan la línea de la enfermedad cuando la cifra de células coadyuvantes, que en un individuo sano es de unas 1000 células por microlitro de sangre, desciende por debajo de 200. Durante esta etapa, el nivel vírico crece drásticamente, en tanto que los indicadores de la actividad inmunitaria descienden hacia un valor cero. Es la pérdida de la competencia inmunitaria lo que hace que microorganismos por lo común benignos (en especial protozoos y hongos) originen enfermedades que amenazan la vida de los pacientes de sida. Una vez que el sida empieza a desarrollarse, los pacientes no suelen sobrevivir más allá de dos años.

El mantenimiento de una buena respuesta inmunitaria ante el ataque constante de VIH pone sobre el tapete la cuestión de por qué el sistema inmunitario se revela incapaz de erradicar el VIH en la mayoría de los casos, si no en todos. Hace unos años, la consideración de ciertos rasgos del VIH indujo a uno de los autores (Nowak) y a sus colaboradores del departamento de zoología de la Universidad de Oxford a sospechar que la solución podría encerrarse en la capacidad que tiene el virus de evolucionar en el organismo humano.

La teoría de la evolución

La teoría de la evolución sostiene que la mutación aleatoria en el material genético de un organismo resulta a veces en un rasgo que le proporciona una ventaja de supervivencia. Es decir, el organismo mutado puede superar mejor que sus iguales los obstáculos para sobrevivir y está mejor dotado para reproducirse prolíficamente. Con el transcurso de las generaciones, la estirpe que comparte el mismo rasgo predomina entre los componentes de la población, viéndose favorecida frente a la de otros miembros —al menos hasta que otro individuo adquiera un rasgo que privilegie su adaptación o que las características del ambiente sean más favorables para otras características. La presión ejercida por el medio determina, pues, qué rasgos se seleccionan para su propagación dentro de una población determinada.

Cuando el grupo de Nowak abordó el ciclo vital del VIH, parecía evidente que el virus estaba especialmente equipado para evolucionar al socaire de las características de la presión con que se enfrentara (las ejercidas por el sistema inmunitario del hospedador). Así, su constitución genética cambia de continuo; y sabido es que una elevada tasa de mutación aumenta la probabilidad de que algún cambio genético dé origen a un rasgo ventajoso. Semejante variabilidad genética se la debe el virus a una enzima propia, la transcriptasa inversa. En el interior celular, el VIH recurre a la transcriptasa inversa para copiar su genoma de ARN en ADN de doble hebra. Este ADN se inserta en un cromosoma del hospedador, y desde allí dirige la producción de más ARN vírico y más proteínas. Estos elementos, a su vez, se ensamblan para dar partículas víricas que pue-



Así hace frente el VIH al sistema inmunitario

La batalla entre el VIH y el sistema inmunitario se desencadena en cuanto el virus se replica en las células infectadas y se escapan nuevas partículas (*1-5, panel izquierdo*). Los niveles crecientes de VIH en el organismo inducen la respuesta de muchos componentes del sistema inmunitario (*panel derecho*). Estas respuestas pueden destruir partículas víricas libres (*1-5*) y células infectadas por virus (*4a y 5a*). Mas, por lo general, son incapaces de eliminar de cuajo el VIH. Una razón de este fallo estriba en

den escaparse de la célula. El virus muta fácilmente durante este proceso porque la transcriptasa inversa es proclive a cometer errores. Se estima que cada vez que la enzima copia ARN en ADN, el nuevo ADN difiere de la generación anterior en un sitio por término medio. Tal comportamiento convierte al VIH en el más variable de todos los virus conocidos.

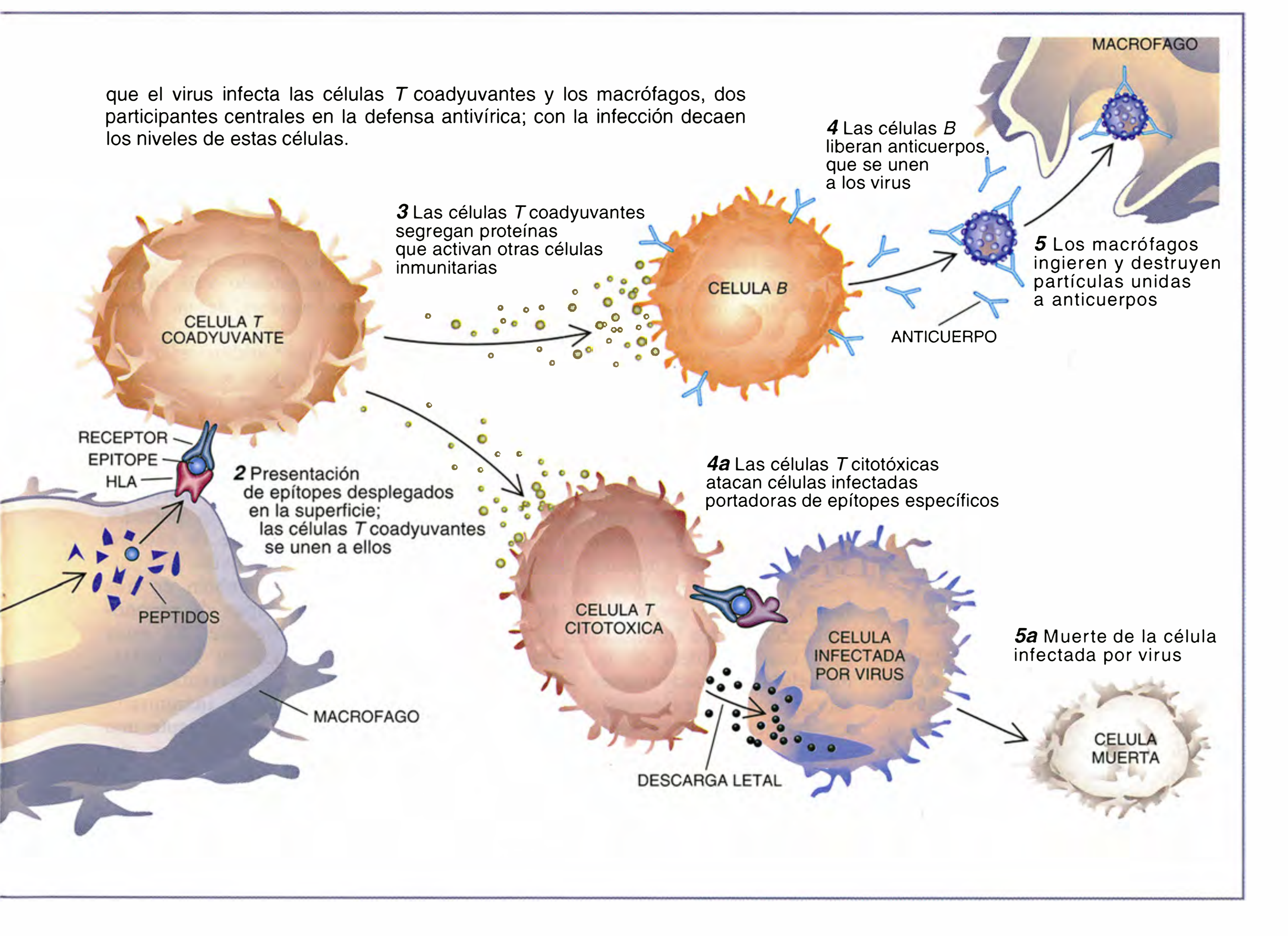
La elevada tasa replicativa del VIH redobla la probabilidad de que surja una mutación útil para el virus. Para apreciar el alcance de la multiplicación del virus, fijémonos en los hallazgos que a principios de este año dieron a conocer los equipos dirigidos por George M. Shaw, de la Universidad de Alabama en Birmingham, y por David D. Ho, del Centro Aaron Diamond de Investigaciones sobre el Sida en Nueva York. Según los datos publicados, en un paciente infectado se producen cada día mil millones de nuevas partículas víricas, tirando por lo bajo. En ausencia de actividad inmunitaria, la población vírica se duplica en promedio cada dos días. De esas cifras se infiere que, entre cada partícula vírica que haya en el organismo diez años después de la infección y el virus original, habrán mediado miles de generaciones. En ese intervalo temporal, el virus puede experimentar un número de cambios genéticos equivalente al del hombre a lo largo de millones de años.

Retablo del desarrollo de la enfermedad

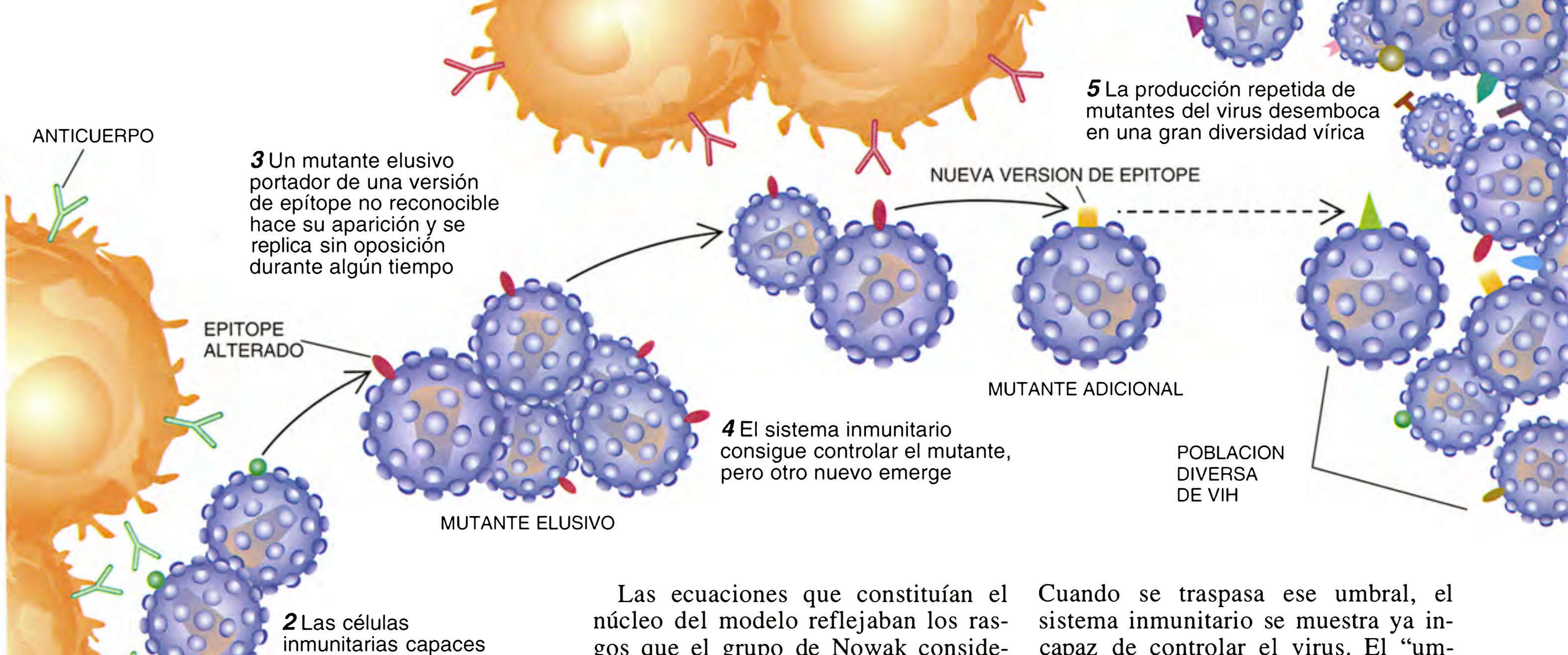
A la vista de este potencial evolutivo del VIH, Nowak y sus colaboradores concibieron un modelo para explicar de qué modo el virus resiste la erradicación completa y da lugar, por tanto, a la enfermedad del sida, de ordinario al cabo de un largo intervalo de tiempo. Su propuesta suponía que la mutación incesante de los genes del virus conduciría a una producción continuada de variantes víricas capaces de saltarse, hasta cierto punto, las defensas del sistema inmunitario operativas en un momento determinado. Estas variantes surgirían cuando las mutaciones genéticas comportaran cambios en la estructura de los péptidos víricos —es decir, los epítopes— reconocidos por el sistema inmunitario. Frecuentemente tales cambios no producen efecto alguno sobre la actividad inmunitaria, pero a veces pueden hacer que un péptido se torne invisible para las defensas del organismo. Las partículas víricas involucradas, portadoras de un menor número de epítopes reconocibles, pasarían con más facilidad inadvertidas para el sistema inmunitario.

La hipótesis proponía que una mutación capaz de evitar que se reconociera un epítope conferiría a la variante del virus una ventaja de supervivencia, al menos hasta que el sistema inmunitario la descubriese y reaccionara con el péptido alterado. Esta respuesta reduciría la carga vírica durante algún tiempo, pero entre tanto otros "mutantes elusivos" empezarían a surgir, y el ciclo continuaría, impidiendo la eliminación total de la infección.

La comprobación de un esquema de esta naturaleza es muy difícil si se recurre exclusivamente a tests clínicos, por la razón fundamental de que



que el virus infecta las células *T* coadyuvantes y los macrófagos, dos participantes centrales en la defensa antivírica; con la infección decaen los niveles de estas células.



2. EL VIH EVADE EL CONTROL inmunitario gracias a su propia capacidad de evolución. En particular, da origen a "mutantes elusivos", que logran zafarse, hasta cierto punto, del reconocimiento inmunitario. En un ejemplo simplificado, una población vírica que lleva un epítope reconocible (*verde en 1 y 2*) sufre mutaciones repetidas en ese epítope (*3-5*). El sistema inmunitario —representado aquí por linfocitos *B* productores de anticuerpos— consigue tener a raya durante algún tiempo estas maniobras, pero la emergencia de un excesivo número de nuevas variantes víricas mina la capacidad del organismo para enfrentarse con el virus.

es imposible el seguimiento detallado de las interacciones no lineales entre el virus y el sistema inmunitario. Nowak dirigió su atención a una simulación por ordenador en la que la población vírica evolucionaba en respuesta a una presión inmunológica. Razonaba que, si el modelo matemático producía los patrones conocidos de la progresión del VIH, el escenario evolutivo resultaría interesante.

Las ecuaciones que constituían el núcleo del modelo reflejaban los rasgos que el grupo de Nowak consideraba importantes en la progresión de la infección por VIH: el virus altera la función inmunitaria al causar la muerte de las células *T* coadyuvantes; ligado con ello, niveles mayores de virus llevan la muerte a más células *T*. El virus promueve también la producción y liberación de nuevos mutantes ("mutantes elusivos") que evitan, en cierta medida, el ataque normal del sistema inmunitario, por lo que estos mutantes se propagan entre la población vírica. Al cabo de un tiempo, sin embargo, las defensas advierten la presencia de los elusivos y provocan una reducción de su población.

El modelo de Nowak distinguía, además, entre dos tipos de respuestas inmunitarias: las que reconocen epítopes que sufren fácilmente mutaciones y las que reconocen epítopes conservados (aquellos que aparecen inalterados en cada partícula vírica del organismo, porque el virus no puede tolerar su pérdida o modificación).

La simulación reproducía la demora característica entre la infección por el VIH y la súbita elevación de los niveles del virus que acaba presentándose en el organismo. Proporcionaba también una explicación de por qué el ciclo constituido por nueva forma mutante ("mutante elusivo") y represión no prosigue de manera indefinida, sino que culmina en una replicación vírica incontrolada, la pérdida casi completa de la población de células *T* coadyuvantes y la instauración de la enfermedad del sida. En particular, el modelo indicaba que el sistema inmunitario puede a menudo montar una defensa simultánea, bastante intensa, frente a diversas variantes del virus. Pese a todo ello, llega un momento, por lo común al cabo de muchos años, en que coinciden múltiples variantes de VIH. Cuando se traspasa ese umbral, el sistema inmunitario se muestra ya incapaz de controlar el virus. El "umbral de la diversidad", como llamamos a ese punto de ruptura, puede diferir de una persona a otra. Por ejemplo, si el sistema inmunitario es bastante débil desde un principio, podría bastar un número relativamente bajo de variantes para desbaratar las defensas del organismo.

¿Por qué la presencia de múltiples variantes del VIH debilita el rendimiento del sistema inmunitario? Lo entenderemos con una explicación intuitiva, que considera la batalla entre el VIH y las fuerzas defensoras del organismo como un enfrentamiento entre dos ejércitos. Cada miembro del ejército del VIH es un generalista, capaz de atacar cualquier célula enemiga que encuentre. Por contra, cada miembro del ejército inmunitario es un especialista, capaz de reconocer un soldado VIH sólo si éste lleva una bandera de un determinado color.

Aceptemos que ambos ejércitos poseerían parejo poder si cada especialista del ejército inmunitario reconociera la misma bandera y cada soldado del bando VIH portase dicho estandarte. Supongamos ahora que el ejército VIH estuviera constituido por tres grupos, cada uno portador de una bandera diferente, y que, en respuesta, los especialistas inmunitarios se dividieran también en tres grupos, cada uno capaz de reconocer una bandera diferente. En estas condiciones, el ejército inmunitario estaría en clara desventaja. Un determinado especialista inmunitario reconocería y atacaría solamente uno de cada tres soldados enemigos que encontrase —aquel que enarbolara la bandera pertinente. Los soldados VIH continuarían, mientras tanto, atacando a cualquier especialista que les saliera al paso y acabarían ganando la guerra.

Predicción del curso de la enfermedad

Además de aportar la noción de umbral de diversidad, el modelo ofrecía una posible explicación de por qué algunos pacientes progresaban hacia el sida con mayor celeridad que otros. Si la respuesta inmunitaria inicial ante los epítopes conservados es contundente, la eficiencia del ataque defensivo contra el VIH no se verá muy quebrada por mutaciones de otros epítopes. (Muchos miembros activos del sistema inmunitario continuarán reconociendo cada célula infectada o cada partícula vírica que descubran.) Por tanto, el organismo debería controlar el virus de manera indefinida, aun con niveles elevados de diversidad vírica. En estos individuos, la progresión hacia el sida sería probablemente lenta, o, incluso, no se produciría en absoluto.

Si la respuesta inmunitaria ante los epítopes conservados no alcanza contundencia suficiente para controlar la población vírica por sí sola, pero el esfuerzo combinado de las respuestas frente a epítopes variables y conservados consigue inicialmente dominar el virus, las fuerzas defensivas podrían obtener un éxito razonable durante algún tiempo. No obstante, la reacción frente a los epítopes variables acabaría minada por formación de nuevos mutantes (elusivos) y aumento de la diversidad vírica. En este caso, los niveles de VIH se elevarían conforme decayera el vigor de la respuesta ante la presencia de epítopes variables. Tal es el patrón al que, según parece, se acomoda la mayoría de los pacientes.

Si las respuestas inmunitarias combinadas frente a epítopes variantes y conservados son muy débiles y no controlan desde el principio la replicación del VIH, el sida se desarrollará con gran rapidez. En esa situación, las partículas víricas originales proliferarían sin encontrar mucha resistencia y el virus apenas sufriría presión para generar mutantes que eludieran el reconocimiento inmunitario. Estos pacientes podrían progresar hacia el sida incluso en ausencia de una diversidad vírica apreciable.

La simulación proporcionaba también claves sobre las probables propiedades de la población vírica en cada una de las etapas de la enfermedad del VIH. En los primeros momentos, antes de que el sistema inmunitario esté muy alertado del peligro, las variantes víricas que se repliquen con mayor celeridad se convertirán en las más abundantes. Por eso, aun cuando el paciente sufriera en un comienzo la infección de diversas variantes, transcurrido un corto intervalo temporal la mayoría de los virus presentes en su organismo derivarían probablemente de la versión con mayor capacidad de crecimiento. Cabe, pues, esperar una escasa diversidad genética durante la fase aguda de la enfermedad.

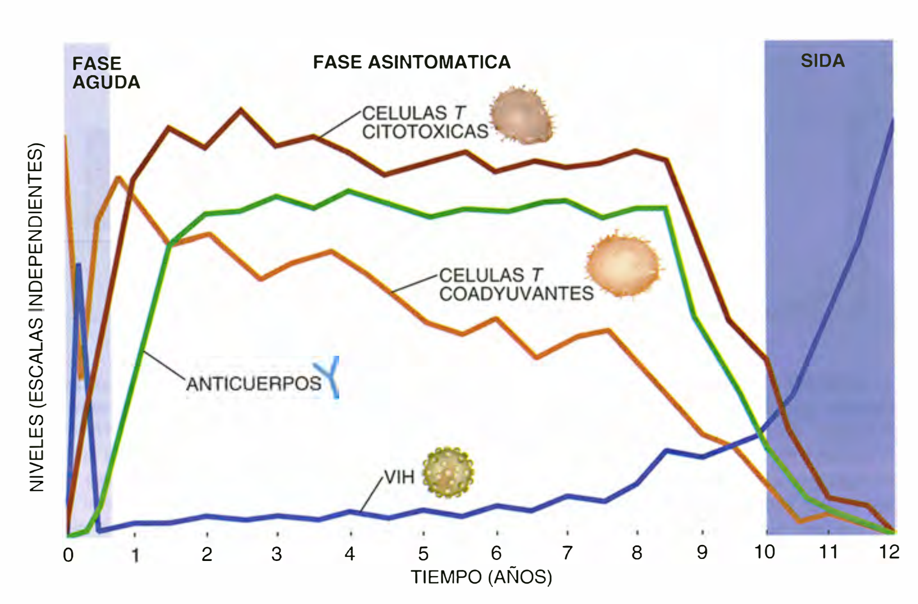
Una vez que el sistema inmunitario entra en estado de mayor activación, la supervivencia se complica para el VIH. Ya no consigue replicarse libremente; el virus tendrá que poder esquivar los ataques inmunitarios. Ahora, podemos predecirlo, la presión de selección dará lugar a un aumento de la diversidad de epítopes reconocibles por las fuerzas de la inmunidad. Una vez producido el colapso del sistema defensivo, desaparece el obstáculo para la supervivencia del virus, y la presión generadora de diversidad se desvanecerá. Por tanto, en pacientes de sida podríamos de nuevo dar por supuestas la selección de las formas variantes de crecimiento más rápido y la caída de la diversidad vírica.

Ciertos trabajos a largo plazo, con un número reducido de pacientes, han confirmado algunas de las predicciones de los modelos. Las investigaciones, realizadas entre otros por Andrew J. Leigh Brown, de la Universidad de Edimburgo, Jaap Goudsmit, de la Universidad de Amsterdam, James I. Mullins, de la Universidad de Washington, y Steven M. Wolinsky, de la Facultad de Medicina de la Universidad Northwestern, han seguido durante varios años la pista de la evolución del segmento V3 presente en una proteína de la envoltura externa del VIH. El V3, muy variable, es uno de los blancos principales de los anticuerpos. En confirmación de lo previsto en la simulación de ordenador, las muestras víricas obtenidas al cabo de unas semanas después de la infección poseían una región V3 muy similar en todas ellas. En cambio, con el paso de los años, esa región se iba diversificando.

Atención a las células asesinas

Los modelos matemáticos originales consideraban el sistema inmunitario constituido en una unidad, sin distinguir entre las actividades de los diversos tipos celulares. A la vista de la extraordinaria presión inmunológica que los linfocitos *T* asesinos parecen ejercer contra el VIH, los autores y sus colaboradores han diseñado recientemente modelos que de una manera específica examinan el comportamiento de estas células. Estos nuevos modelos nos enseñan algo más sobre la forma en que el VIH emplea sus capacidades para erosionar las defensas del sistema inmunitario.

Comenzamos nuestro trabajo sobre dichas simulaciones a principios del



3. EL CURSO de una infección de VIH suele prolongarse a lo largo de muchos años, durante la mayoría de los cuales el paciente permanece asintomático. Sorprendentemente, las defensas del organismo —reflejadas en los niveles de anticuerpos, células *T* citotóxicas y células *T* coadyuvantes en la sangre— permanecen firmes a lo largo de la mayor parte del período asintomático y erradican casi tantos virus como se producen. Llega un momento, sin embargo, en que las defensas inmunitarias pierden el control sobre el virus, que se replica de manera desbocada y lleva al sistema inmunitario hacia su colapso total.

año 1994; la razón circunstancial: McMichael, uno de los autores, se había quedado perplejo ante los resultados que había obtenido con su grupo tras seguir la pista de las respuestas de las células *T* citotóxicas ante el VIH en pacientes inicialmente asintomáticos. Esos estudios, en los que se había hecho un seguimiento de los pacientes durante unos cinco años, se emprendieron para valorar la influencia de las diferentes moléculas de HLA sobre la capacidad de los pacientes en su lucha contra el virus.

Las moléculas de HLA intervienen de una manera decisiva en la respuesta de defensa. Son ellas las que determinan qué péptidos víricos se mostrarán en la superficie celular en las células y con cuánta eficacia se presentarán encajonados en el surco. De un paciente a otro cambia verosímilmente la mezcla precisa de las moléculas de HLA que poseen. Por consiguiente, diferirán también en los epítopes peptídicos que sus células exhiben y en la capacidad de las unidades HLA-péptido para atraer la atención del sistema inmunitario. La mayoría de los pacientes infectados con el VIH parecen reconocer unos cuantos epítopes de entre los múltiples potenciales generados a partir de las proteínas del virus, por lo común entre uno y diez.

Las investigaciones clínicas examinaron la respuesta de las células *T* citotóxicas ante diversos epítopes en una *gag*, una proteína interna del VIH. Tres de los pacientes usaban la HLA variante B27 para esa presentación, y otros dos la HLA-B8. En los pacientes B27, la respuesta de las células *T* citotóxicas iba dirigida contra un solo fragmento de la proteína *gag*, que apenas si varió en su estructura durante el curso del estudio. En los pacientes B8, la actividad citotóxica de la célula *T* iba dirigida contra un grupo de otros tres segmentos de la proteína *gag*. Estos tres epítopes generaron mutantes durante el estudio, y muchos de los péptidos mutantes evadieron el reconocimiento de las células citotóxicas del hospedador. Resultó también que la intensidad relativa de las respuestas dirigidas contra los tres epítopes fluctuó notablemente.

Estos trabajos aportaron los primeros datos sobre la existencia de virus mutantes capaces de evadir las células *T* citotóxicas en el organismo humano. Y, al mismo tiempo, planteaban otras cuestiones inesperadas, una en particular: ¿por qué fluctuaba tanto la intensidad de las respuestas de las células *T* frente a los distintos epítopes? En la mayoría de las demás infecciones víricas las respuestas, que suelen dirigirse contra uno o varios epítopes, no muchos, son más estables.

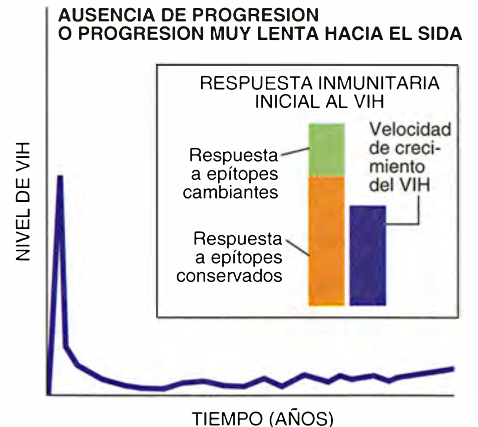
¿Por qué se descarrían las células asesinas?

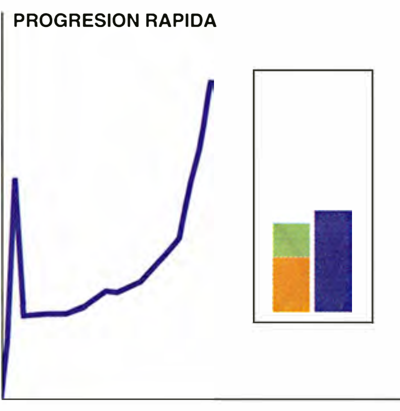
Fue en parte el deseo de resolver este problema lo que movió a nuestros dos equipos a colaborar en la realización de modelos de ordenador sobre las respuestas de las células *T* citotóxicas ante la agresión del VIH. Los programas suponían que la fragmentación de las partículas víricas en las células infectadas induciría el despliegue de muchos epítopes reconocibles por las células *T* citotóxicas. Los modelos consideraban también que la mayoría de los epítopes serían susceptibles de mutación y, por tanto, capaces de dar variantes víricas con cambios en algunos de sus epítopes.

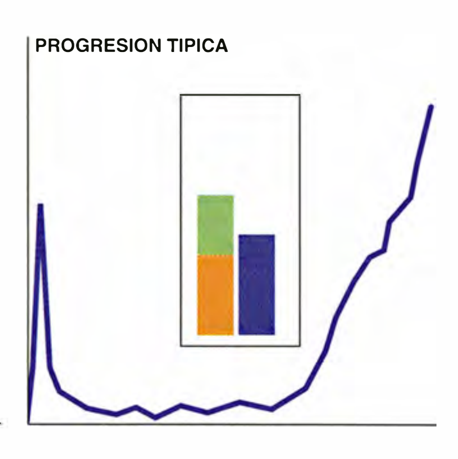
Los modelos introducían mutaciones al azar en los epítopes, siguiendo después la pista del crecimiento de cada una de las nuevas variantes víricas, así como de la abundancia de células *T* citotóxicas dirigidas contra cada epítope. La concentración de células *T* que reconocen un epítope determinado —y, por tanto, el poder destructor de estas poblaciones— se hizo depender del número de partículas víricas portadoras de ese epítope y del poder estimulador del péptido. (Algunos epítopes aventajan al resto en lo que se refiere a la replicación de células *T*.)

Los resultados de modelos que consideraban epítopes múltiples eran, por decirlo prudentemente, bastante complejos. En esencia, sin embargo, la eficacia del sistema inmunitario mermó a lo largo del tiempo, y la caída se asemejaba bastante a la fluctuación de la reactividad inmunitaria observada en los dos pacientes que producían moléculas de HLA del tipo B8. La fluctuación parecía derivarse de una suerte de pugna entre poblaciones de células *T* citotóxicas.

Nuestros cálculos sugieren que, en el organismo, un clon de células *T*



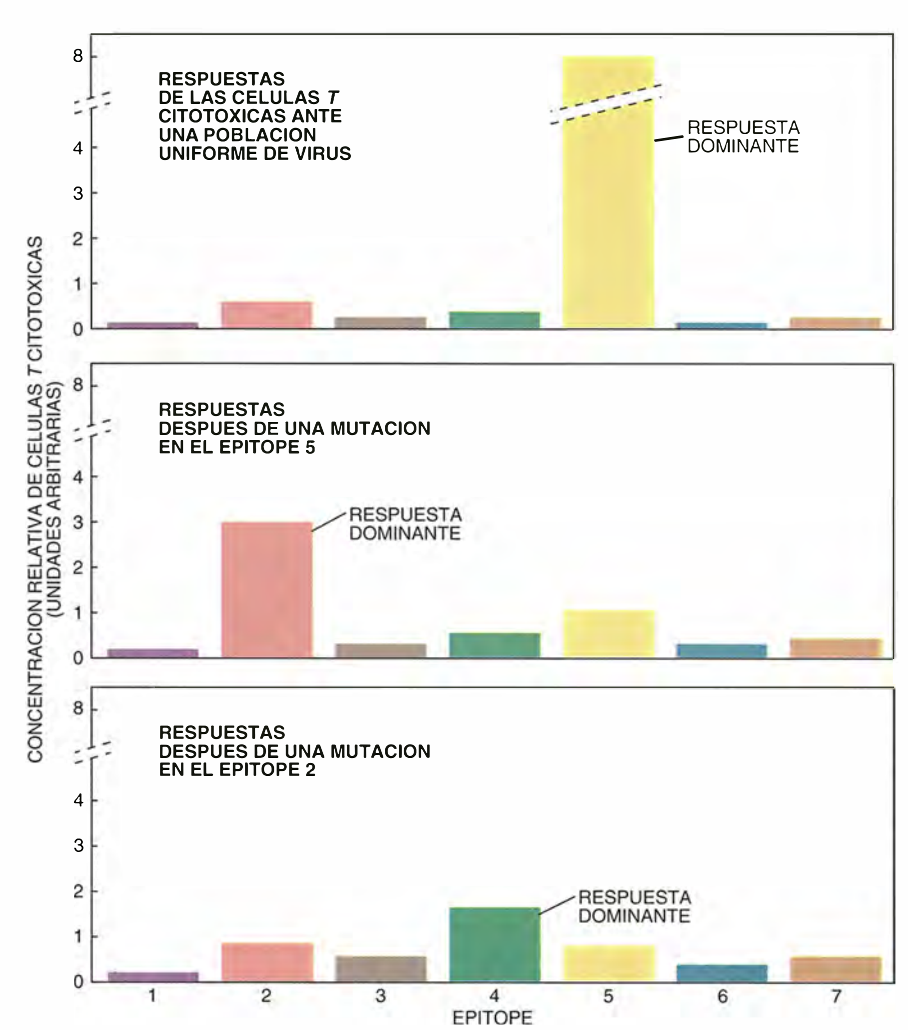




4. RITMO DE PROGRESION DE LOS NIVELES DEL VIH (*líneas azules*) a lo largo de los años. Podría depender directamente de la composición inicial de la respuesta inmunitaria (*recuadros*). Los modelos sugieren que, si el ataque inmunitario dirigido contra los epítopes conservados (los que se encuentran en todas las partículas víricas) puede limitar el crecimiento vírico por sí solo (*izquierda*), el organismo puede mantener indefinidamente unos niveles víricos bajos, incluso después de que la respuesta ante epítopes cambiables haya decaído. Este patrón de comportamiento se sale de lo común. Si las respuestas del sistema inmunitario combinadas son débiles (*centro*), los niveles víricos se elevan rápidamente. Si las respuestas combinadas son intensas, pero la respuesta "conservada" no puede por sí misma controlar el virus (*derecha*), debería de instaurarse el curso típico, relativamente lento, de multiplicación vírica. En esa situación, los niveles de infección comenzarán a subir en picado cuando se pierde la capacidad para responder como es debido a los epítopes cambiables.

citotóxicas (una población que reconoce un epítope) compite con todas las demás por la supremacía. A medida que se produce la respuesta inicial de las células citotóxicas, que implica muchos clones, la población vírica mengua, reduciéndose por consiguiente el número de señales estimuladoras recibidas por las células *T*. Por último, sólo los clones de células *T* que reconocen la mayoría de los epítopes estimuladores permanecen activos, y la respuesta de las células *T* puede incluso quedar bajo el dominio de un solo clon.

Un proceso de este tipo podría ser beneficioso y, en potencia, capaz de eliminar un virus si éste no cambiara. Por otra parte, si el epítope que mantiene activa la respuesta dominante sufre una mutación, el correspondiente clon de células *T* podría no reconocer el mutante. Las partículas víricas portadoras de este péptido pueden multiplicarse entonces, pasando inadvertidas. A veces el sistema inmunitario es capaz de hacerse con el grupo de renegados y organizar una defensa dirigida contra la nueva versión del epítope; pero otras el sistema defensivo puede desviar su atención hacia un epítope diferente y en un principio menos estimulador. Este cambio puede repetirse muchas veces, produciéndose un patrón muy intrincado en el que la abundancia relativa de clones de células *T* fluctúa sin interrupción. La aparición de una forma no reconocible de un epítope puede dar lugar a un doble problema. Además de reducir directamente la intensidad del ataque contra la forma variante, puede inducir un cambio en el sistema inmunitario de manera que éste desvíe sus esfuerzos hacia epítopes menos estimuladores.



5. SIMULACION POR ORDENADOR en la que se siguieron los niveles de células *T* citotóxicas en un paciente hipotético. En un comienzo (*arriba*) las células *T* respondían ante una población homogénea de partículas de VIH, cada una con siete epítopes reconocibles; el epítope 5 provocó la respuesta más intensa (*amarillo*). Después de que emergiera un mutante vírico portador de una versión alterada y no reconocible de este epítope (*panel intermedio*), la respuesta dominante se centró sobre otro epítope menos estimulador, el número 2 (*rojo*). Y después de que el epítope 2 sufriera una mutación (*abajo*), la preponderancia cambió de nuevo, hacia el número 4 (*verde*), un epítope más débil aún. Estos cambios podrían contribuir a la merma del control inmunológico en pacientes infectados con VIH.

Consideraciones en torno a la terapia

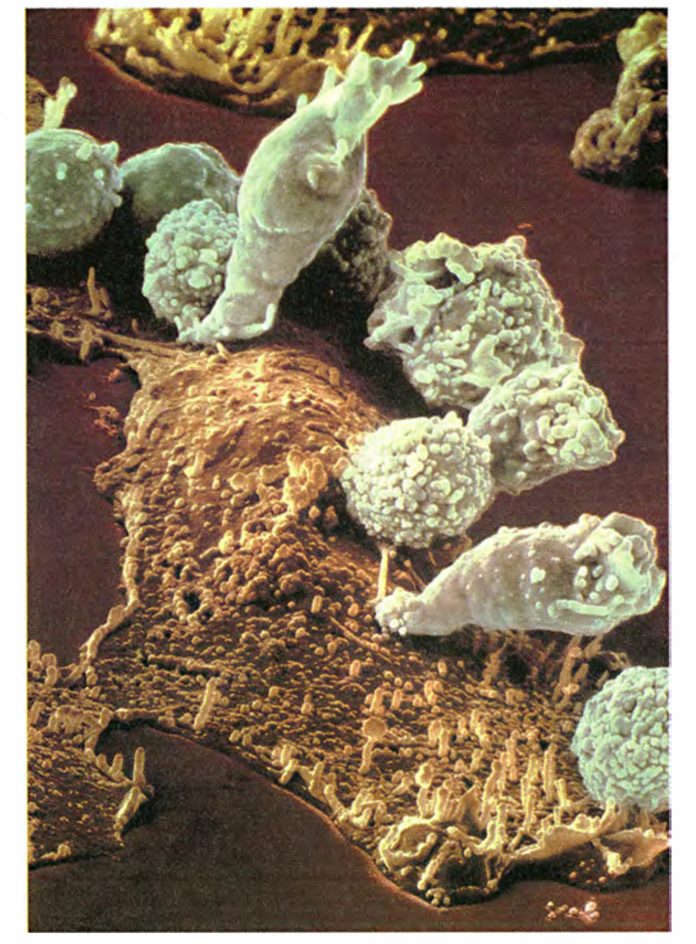
De acuerdo con la imagen global que va tomando cuerpo a partir de nuestras últimas simulaciones, la diversidad de epítopes provoca fluctuaciones en la respuesta inmunitaria y una desviación hacia epítopes de debilidad creciente. Esta desviación conduce a niveles elevados de VIH y, a su vez, a una destrucción más rápida de células coadyuvantes y de macrófagos, amén de un menor control sobre el conjunto de la población vírica. Dicho de otro modo, la diversidad vírica parece ser la que empuja la progresión de la enfermedad. Estas simulaciones de epítopes múltiples pueden aplicarse también a las respuestas de anticuerpos.

Si el lector no está familiarizado con estos hallazgos podría sospechar razonablemente que los pacientes que responden a muchos epítopes diferentes controlarán mejor la población del virus, porque una partícula vírica que escape inadvertida para un clon de células inmunitarias despertaría, a buen seguro, la atención de otro. Sin embargo, nuestros modelos predicen que, en el caso del VIH, una respuesta ante muchos epítopes diferentes puede ser un mal agüero: una señal de que epítopes importantes pueden haber sufrido mutaciones no reconocibles. Las simulaciones implican que los pacientes cuyas defensas inmunitarias reconocen de manera estable uno o algunos epítopes controlan probablemente mejor el virus que aquellos que responden a un gran número de epítopes. Esta idea está apoyada por un hallazgo interesante del estudio sobre HLA citado antes. Los dos pacientes que presentaban respuestas fluctuantes de células *T* progresaban hacia la enfermedad más deprisa que aquellos otros en los que sus respuestas estaban relacionadas con un solo epítope. Sin embargo, este estudio no permite sacar por el momento conclusiones definitivas debido al escaso número de pacientes examinados.

Si los modelos reflejan con precisión el curso de la enfermedad del VIH, los hallazgos deberán influir en el desarrollo de vacunas (para la prevención o el tratamiento) y terapias basadas en el uso de fármacos. En

el caso de las vacunas, sería contraproducente estimular la actividad inmunitaria frente a una variedad de epítopes en un mismo individuo. A la postre, una estimulación de ese tipo podría provocar un enfrentamiento entre fuerzas inmunitarias. Sería preferible potenciar la respuesta contra un solo epítope conservado, aun cuando éste no sea el que de inmediato se reconoce con una mayor facilidad. Tal respuesta podría, en teoría, desencadenar una nueva respuesta persistente capaz de controlar el VIH. El truco, por supuesto, consistiría en la identificación de epítopes conservados y encontrar la mejor manera de administrarlos.

Otra implicación bastante llamativa de los modelos se refiere a la replicación, rápida e incesante, del virus en todas las etapas de la infección. Ese convencimiento ha llevado a muchos clínicos a la conclusión de que los agentes químicos capaces de detener la replicación vírica serán probablemente más eficaces cuando se administran en una etapa precoz, antes de que el virus haya tenido ocasión de propagarse en demasía. Las terapias de combinación pueden también resultar más eficaces que un solo fármaco, porque aun cuando el virus generase una población mutante resistente a una droga los otros fármacos podrían mantener su eficacia. Considerando la cadencia de replicación, tales estrategias deberían frenar el ritmo de aparición de formas mutantes y limitar así la diversidad vírica. Nuestros modelos sugieren, además, que, si se reducen los niveles víricos y se limita de este modo la diversidad vírica, se conseguirá ayudar al sistema inmunitario a contener el virus.



6. EN SU ATAQUE LETAL, los linfocitos *T* citotóxicos destruyen una célula cancerosa de manera semejante a como lo hacen con una célula infectada por virus. Muchos linfocitos se adhieren a la célula diana y segregan sustancias que actúan a modo de taladros sobre la membrana celular.

Dinámica del VIH

El conjunto de datos clínicos y matemáticos reunidos pone de manifiesto que el VIH, además de replicarse masivamente en los pacientes infectados, sufre reiteradas mutaciones, generándose así una enorme diversidad de poblaciones víricas. Estos rasgos permiten al virus evolucionar en respuesta a las amenazas que encuentra durante el curso de una infección. Mutantes capaces de evadir, en cierta medida, el ataque inmunitario hacen su aparición y predominan hasta que el sistema inmunitario recaba la energía para sofocarlos, aunque mientras tanto nuevos mutantes ("mutantes elusivos") inician su multiplicación. El poder pasa así repetidamente, y durante algún tiempo, del virus al sistema inmunitario, y de éste a aquél.

Sin embargo, estos vaivenes no se mantienen de manera indefinida, al parecer porque la evolución de la diversidad vírica inclina gradualmente la balanza en favor del virus. La diversidad privilegia a éste, en parte porque la variabilidad confunde al sistema inmunitario del paciente, cada vez menos eficaz, situación que deja a la población vírica camino libre para propagarse y destruir un número creciente de células coadyuvantes.

Por supuesto, la destrucción de células coadyuvantes afecta al funcionamiento de las células *T* citotóxicas y a las células *B*, que reaccionan enérgicamente sólo cuando se estimulan por las proteínas segregadas de las células coadyuvantes. Conforme las células pertenecientes a estos dos tipos ven mermada su eficacia, se llega a una espiral potencialmente letal con una elevada tasa de destrucción de células *T* y un declive de la capacidad de respuesta del sistema inmunitario en su conjunto.

La generación de mutantes provoca así una merma creciente de la eficacia del sistema inmunitario. Llega un momento en que la diversidad resulta inabarcable para el sistema inmunitario, y el VIH se hurta por entero a su control. A medida que se eleva la carga vírica, se acelera la destrucción de células coadyuvantes y se cruza el umbral del sida. Por último, el sistema inmunitario queda colapsado. En resumen, parece que un escenario evolutivo puede explicarnos a través de un largo camino por qué la infección del VIH suele progresar lentamente y siempre, o casi siempre, acaba destruyendo el sistema inmunitario.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ANTIGENIC DIVERSITY THRESHOLDS AND THE DEVELOPMENT OF AIDS. M. A. Nowak, R. M. Anderson, A. R. McLean, T. F. W. Wolfs, J. Goudsmit y R. M. May en *Science*, vol. 254, págs. 963-969; 15 de noviembre de 1991.

HUMAN IMMUNODEFICIENCY VIRUS: GENETIC VARIATION THAT CAN ESCAPE CYTOTOXIC T CELL RECOGNITION. R. E. Phillips y cols. en *Nature*, vol. 354, n.º 6353, páginas 453-459; 12 de diciembre de 1991.

HOW DOES HIV CAUSE AIDS? Robin A. Weiss en *Science*, vol. 260, páginas 1273-1279; 28 de mayo de 1993.

CUASIESPECIES VÍRICAS. Manfred Eigen en *Investigación y Ciencia*, vol. 204, páginas 14-22; septiembre de 1993.

MULTIFACTORIAL NATURE OF HUMAN IMMUNODEFICIENCY VIRUS DISEASE: IMPLICATIONS FOR THERAPY. Anthony S. Fauci en *Science*, vol. 262, páginas 1011-1018; 12 de noviembre de 1993.

ANTIGENIC OSCILLATIONS AND SHIFTING IMMUNODOMINANCE IN HIV-1 INFECTIONS. M. A. Nowak, R. M. May, R. E. Phillips, S. Rowland-Jones, D. Lalloo, S. McAdam, P. Klenerman, B. Köppe, K. Sigmund, C. R. M. Bangham y A. J. McMichael en *Nature*, vol. 375, páginas 606-611; 15 de junio de 1995.

Kristin Leutwyler

NICHOLAS NEGROPONTE: *El mago del ciberespacio*

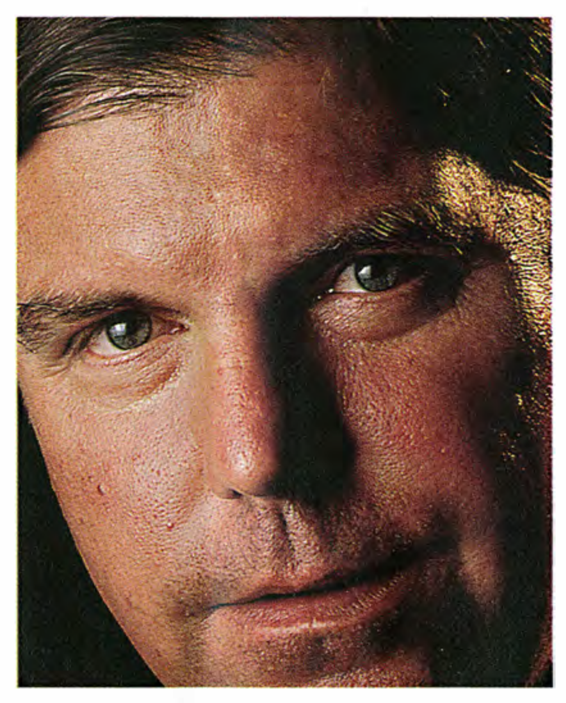
Ha sido un año ajetreado para Nicholas Negroponte. En enero publicó *Being Digital*, de resonante éxito, tejido con la sección que escribe en la revista *Wired*. En mayo, el Laboratorio de Medios de Comunicación del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), del que es cofundador y director desde su comienzo en 1985, lanzó una nueva línea de investigación. En junio, mientras veraneaba en la isla griega de Patmos, los 100 mensajes diarios recibidos por correo electrónico —más de la mitad de ellos de su creciente cohorte de seguidores, y cinco por lo menos de redactores que le pedían una entrevista— le desbordaron.

Esperé durante seis días una respuesta al mío. En el MIT ya se me advirtió de su escasa afición a las llamadas telefónicas, faxes y entrevistas personales. Le sugiero un intercambio semanal de mensajes electrónicos. El 4 de junio responde a mi "¿Interesado?" de esta guisa: "No es la palabra que uso para referirme a lo que siento ante las 'entrevistas'", comienza. Le envío un suave "¿Factible?" el mismo día. Una semana más tarde me responde afirmativamente, pero me avisa: "Intento llevar una vida bastante privada. Debe adentrarse poco en la faceta personal e insistir más en lo del laboratorio si quiere que yo colabore."

Para redondear el ensayo, busco en revistas y recortes. Se repiten. "Ingenuamente, pensaba que con *Being Digital* dejaría de ser un disco rayado", admite Negroponte en una transmisión. "Me parece que siempre digo lo mismo."

Al igual que su libro, el texto que me envía es una serie de anécdotas. "Escribo a propósito capítulos cortos, párrafos cortos y frases cortas", dice. "Ya conoce la sentencia de Pascal: 'Si hubiera tenido más tiempo, te habría escrito una carta más corta'." Hubiera deseado que Negroponte no estuviera de vacaciones. De niño era disléxico. Así que en vez de leer se pasó horas cavilando sobre horarios de trenes, deleitándose en establecer conexiones perfectas entre ignotas ciudades europeas, un ejercicio al que atribuye algunas de sus habilidades para los negocios. En cada sección, esboza gran parte de su propia historia, relacionando intereses, gentes, proyectos y patrocinadores.

Tras acabar la educación primaria en Suiza a los 15 años, con la máxima puntuación en matemáticas, se matriculó en una escuela secundaria en Estados Unidos. "En ese momento de mi vida", escribe, "estaba decidido a ser artista. El destino lo quiso de otra manera." Una rápida admisión en el MIT y "un poco de coacción paterna" le llevaron a Cambridge (Massachusetts) en 1961. A fin de sacar el máximo provecho de su talento para las matemáticas y el dibujo, decidió estudiar arquitectura, una disciplina "en la intersección entre arte y tecnología". Estudió una carrera de cinco años en cuatro, y acabó una segunda al año siguiente, en 1966. "Ese fue el año en el que me enamoré de la informática y me encontré envuelto en el nacimiento del diseño asistido por ordenador (DAO)."



EL DIRECTOR DEL LABORATORIO de Medios de Comunicación califica al centro de "sistema de alerta rápida del futuro"

Durante el verano, Negroponte cultivó este nuevo interés en el Centro Científico de IBM en Cambridge, donde trabajaba su mujer. Llevaba una semana allí cuando el padre del DAO, Steven A. Coons, del MIT, le pidió que diera un curso de ingeniería mecánica. "Eso me llevó de vuelta al MIT, a cuyo claustro pertenezco desde entonces." Sin embargo, siguió en IBM a tiempo parcial durante dos años, desarrollando un programa de diseño arquitectónico asistido por ordenador: la serie URBAN.

Negroponte afirma que el Laboratorio de Medios de Comunicación está concebido para que sea una cueva de ratas de ordenador, donde la "pasión", no el deber, mueva la investigación. Pero él dejó atrás sus días de fogosa adicción, cuando trabajaba en la serie URBAN. "Luché a brazo partido con el lenguaje máquina, los editores de compilación y montones de huesos duros de roer", recuerda. "Cuando IBM me pidió que lo llevara al siguiente nivel de usuario, me di cuenta de que eso era demasiado simple desde el punto de vista arquitectónico." Así que se volvió a emplear a tiempo completo en el MIT, donde sus experiencias con URBAN produjeron un libro, *The Architecture Machine*, un grupo de investigación con el mismo nombre y, en último término, su interés de por vida en producir "sistemas informáticos altamente personalizados, sistemas que puedan reconocer 'gestos, ceños, sonrisas' y que puedan acomodar la idiosincrasia del DAO a cada persona."

O a la de las ratas de laboratorio. El primer proyecto de Arch Mach, que es como se conoce al grupo que fundó, fue una muestra en el Museo Judío de Nueva York. "Era un sorprendente sistema robótico en el que unos ratones de laboratorio (sí, rato-

nes) más o menos controlaban al robot para que dispusiera la geometría del lugar donde habitaban", explica Marvin Minsky, uno de los "héroes" de Negroponte. "Si quitaban de en medio algo unas cuantas veces, la máquina lo cambiaba de sitio." Y funcionó.

"De vuelta en el MIT, el trabajo se iba haciendo menos estrafalario, lo que abrió el camino para la informática personalizada", continúa Negroponte. En 1976 el grupo ideó el concepto de Sistema de Tratamiento de Datos Espaciales (STDE), uno de los primeros pasos en el desarrollo de los multimedia. Sucintamente, la idea era que la gente podría interactuar más directamente con los ordenadores accediendo a los datos cual si se tratara de cualquier otro objeto: alargando la mano. La pieza más importante de STDE era Dataland: una habitación para exhibiciones equipada con una silla Eames instrumentalizada, una pantalla en color que ocupaba toda una pared y sonido octofónico. Quien se sentara en la silla podía "volar" sobre Dataland y aterrizar en calculadoras, libros electrónicos o mapas.

"STDE iba tan por delante de su tiempo, que su impacto se perdió casi por completo", escribe Negroponte. De hecho, Dataland le valió su primera candidatura al premio Vellocino de Oro, que el senador William Proxmire concedía a los programas de investigación que consideraba quiméricos. "No sé cuántas veces he sido candidato. La asesoría de Proxmire era astuta y remilgada. Retrospectivamente, es fácil desear haber ganado. Siempre es bonito que te consideren totalmente equivocado y que luego resulte que estabas en lo cierto." Dataland fue la primera interfaz informática en emplear un entorno que intentaba reproducir un escritorio. Y aunque muchas de las ideas que subyacen en el Macintosh de Apple proceden de Xerox, el uso de iconos, y el nombre mismo, son de Arch Mach.

El equipo de Negroponte forjó el nexo entre los gráficos de ordenador y la televisión y abrió nuevos horizontes para las películas interactivas y las teleconferencias. "Nicholas sabe cómo mantener la investigación en primera línea", asegura Minsky. "Cuando el gran público acepta algo, ¡anima al laboratorio a dejar el tema!' Suele adivinar, con anticipación de años, lo que merece la pena y promueve proyectos en esas áreas."

No todo el mundo en el MIT comparte esa misma fe en el criterio precursor de NN. Cuando en 1978 propuso que el MIT construyera un nuevo "laboratorio tecnológico de las artes y los medios de comunicación" para explorar la convergencia de las retransmisiones, las editoriales y las industrias informáticas, "algunos encontraron la idea peregrina", admite. No así Jerome B. Wiesner, otro "héroe" y presidente del MIT en aquel entonces. En 1979 la corporación del MIT dio el visto bueno, y Negroponte y Wiesner se lanzaron a buscar 12 millones de dólares. "Tras cinco años, tres millones de kilómetros y 50 millones de dólares, el Laboratorio de Medios de Comunicación vio la luz", cuenta.

Poco después de que abriera sus puertas, en 1985, el Laboratorio de Medios de Comunicación despegó, casi duplicando su presupuesto cada año. "Como las telecomunicaciones andaban detrás del negocio de la información, y las compañías informáticas estaban preocupadas ante el recorte de márgenes, era difícil que el Laboratorio de Medios de Comunicación no creciese."

Gracias a Wired, *a* Being Digital, *e incluso a usted, soy hombre público en grado más que suficiente para mi trabajo en el Laboratorio*

Aunque el Laboratorio comenzó a cortejar a las telecomunicaciones y a las compañías informáticas en el momento preciso, Negroponte le adjudica gran parte del éxito a Wiesner: "Me enseñó todo lo que sé sobre cómo funcionar con mentalidad empresarial en un ambiente académico." Negroponte ha aprendido también fuera del MIT. Es socio de una fundación que financia la puesta en marcha de compañías de información y ocio. Ha invertido personalmente en *Wired* porque "la gente era la adecuada y el momento era el oportuno". Y también ha puesto dinero en bombones holográficos. ("No me he empachado", escribe. "El golpe lo van a dar las piruletas, porque son mucho mejores para ver los hologramas por transmisión; resultará delicioso ver cómo cambia la imagen conforme chupas.")

Dice que Wiesner también le enseñó a dirigir un laboratorio: "Se trabaja para el personal, y el mejor personal es normalmente el que más problemas crea; pero vale la pena." Pone como ejemplo a dos leyendas del Laboratorio: Seymour A. Papert, que codirigió el laboratorio de Inteligencia Artificial con Minsky, y el fallecido Muriel R. Cooper, a quien se califica de "motor diseñador del laboratorio". El esfuerzo produjo sus frutos. "Hace diez años se nos consideraba carentes de interés y poco apetitosos", escribe Negroponte. "Aunque las cosas han cambiado, todavía hay gente que piensa que estamos aislados."

Si no en la ciencia, en el estilo sí que son únicos. El grácil edificio blanco, con tejas, que alberga el Laboratorio de Medios de Comunicación, un proyecto de I. M. Pei (otro "héroe" más), resalta entre los grises laberintos de hormigón. Se trata de aportar ideas nuevas, no de lucirse para la galería. En vez de "el ambiente de campamento militar en la docencia y la investigación" que prevalece en otros departamentos, el laboratorio intenta "dar cuerda, más que imponer deberes, para probar" a los miembros jóvenes.

"Gracias a *Wired*, a *Being Digital*, e incluso a usted, soy hombre público en grado más que suficiente para mi trabajo en el Laboratorio", declara. "Intento aparentar que soy un yanqui novato, que aprende poco a poco" con la esperanza de no llamar la atención. Pero dado su contagioso optimismo y su talento para bosquejar cómo será el futuro, no es fácil.

De fiarnos de Negroponte, pronto seremos bendecidos con interfaces de ordenador tan agradables y personales como un mayordomo bien educado. Se harán cargo de nuestros asuntos, compondrán periódicos personalizados y nos ayudarán a liberarnos de las trabas del tiempo y del espacio. El último proyecto del Laboratorio de Medios de Comunicación, llamado Cosas Que Piensan, pretende inventar maneras de fabricar cosas, desde grilletes hasta abrigos, para que resulten a la medida. "Ser digital, sea lo que fuere —escribe—, significa sobre todo hacer las cosas a tu aire."

Al hablar con ese tono, no puede dejar de haber gente a la que le moleste con detalles. Cliff Stoll, el autor de *Silicon Snake Oil*, uno de sus críticos, advierte que ser digital nos llevará a legiones de solitarios adictos al ordenador en red. Negroponte, que se define a sí mismo como un usuario compulsivo del correo electrónico, se ríe ante semejante acusación. Siempre entusiasta, replica que, si acaso, ser digital ayuda a mejorar la calidad de vida, excepto quizás a las personas mayores.

Ciencia y sociedad

Precámbrico

Tapices algales

Aunque buscaba las Indias, Cristóbal Colón recaló en las Bahamas. Quinientos años después, otros exploradores mejor documentados, los microbiólogos, llegan también a estas islas sabiendo muy bien lo que esperan hallar: tapices algales, que son la forma de vida con el linaje más antiguo, si no el más distinguido, de cuantos existen en la Tierra.

Hans W. Paerl y James L. Pinckney andan husmeando en un sinfín de porquerías que tengan la consistencia de moco gelatinoso, fango seco o cualquier cosa intermedia. Trepan a farallones traicioneros azotados por el océano Atlántico para encontrar charcas de marea colonizadas por las algas. Y vadean en las aguas sulfurosas y turbias de lagos hipersalinos en su búsqueda tenaz del primo moderno del cieno primordial.

Los tapices microbianos (compuestos principalmente por cianobacterias, o algas verdiazules, y diatomeas) no parecen ser gran cosa en el mundo complejo de la biología. Los filamentos microscópicos de las algas se entrelazan y tejen una alfombra. Cada capa, en función de su exposición a la luz y al oxígeno, realiza su propia misión en lo que es un minúsculo ecosistema, estratificado y muy regulado. Aunque no está claro cómo se forman, los tapices sobreviven gracias a la cooperación: diferentes especies de bacterias fotosintetizan y al mismo tiempo reciclan nitrógeno, sulfatos, fósforo y dióxido de carbono. Reciclan internamente todos los nutrientes, y sólo requieren del exterior nitrógeno, agua y luz solar.

Las comunidades de tapices de otras zonas del mundo contienen muchos de los mismos elementos esenciales, pero cada una presenta su estructura peculiar. Las distintas texturas han inspirado nombres tales como "ectoplasma" para un tapiz particulamente mucilaginoso, y "*brie*" para otro cubierto con una película de color blanco gredoso. Cuando se cortan en fragmentos regulares para su análisis, algunos tapices parecen bizcochos de chocolate o gomas de borrar de color rosa.

La biodiversidad del tapiz puede suponer su garantía de futuro. "Algún día quizá se utilicen en las estaciones espaciales para regenerar el oxígeno", dice Paerl. Fáciles de cultivar porque apenas si necesitan nutrientes, los tapices microbianos sirven ya para purificar el agua en efluentes de estanques de lagunaje y en plantas de tratamiento de aguas residuales. Pueden descomponer macromoléculas orgánicas, como hidrocarburos y plaguicidas, y satisfacer requerimientos bioquímicos anaerobios, como la desnitrificación y la disolución de metales.

Por si estas entidades autosuficientes no fueran lo bastante ingeniosas, algunas incluso fabrican rocas. Las bacterias precipitan el carbonato cálcico del agua de mar, lo que hace que los tapices se transformen lentamente en piedra. Los fósiles más antiguos que se conocen, de unos tres mil millones de años de antigüedad, llamados estromatolitos, son masas bulbosas de cianobacterias calcificadas.

Los tapices sirven asimismo como modelos para estudiar la dinámica de ecosistemas mayores. "Todos los principales ciclos biogeoquímicos y redes tróficas biológicas tienen lugar en los milímetros superiores de los tapices microbianos", resalta Paerl. "Viene a ser como comprimir cientos de hectáreas de pluviselva o varios arrecifes de coral en un frasco minúsculo." Paerl y Pinckney han investigado los tapices para comprender los procesos que conducen a problemas devastadores, tales como las proliferaciones de algas y la depleción de oxígeno en los estuarios.

Esta importancia ambiental no se halla limitada ni mucho menos al presente. Durante la era Precámbrica, los primeros tres mil millones de años de la historia de la Tierra, reinaban las cianobacterias. En este período las algas verdiazules vertieron oxígeno a la atmósfera y extrajeron de ella dióxido de carbono en cantidades suficientes para hacer que el planeta fuera acogedor para otros seres. Como consecuencia, las algas terminaron su propio reinado, al menos por ahora. Se están explorando los usos farmacéuticos, agrícolas, biotecnológicos, alimentarios y otros que puedan tener estos pegajosos tapices.

CHRISTINA STOCK



Tapices microbianos microscópicos (izquierda) *y enteros* (derecha)*; proporcionan claves para comprender la dinámica de los ecosistemas*



UPS-Sat 1

Primer satélite universitario español

El pasado 7 de julio, sobre las 18.20, hora española, tuvo lugar desde la Guayana Francesa el lanzamiento del pequeño satélite universitario español UPM-Sat 1. Este satélite, al igual

que el pequeño satélite francés Cerise, de características geométricas y másicas semejantes a las del hispano, viajó al espacio como carga de pago secundaria en el vuelo V75 de un lanzador Ariane IV-40, cuyo cliente principal fue el satélite militar Helios.

El UPM-Sat 1 sigue una órbita polar heliosíncrona a 650 kilómetros de altitud, de modo que pasa sobre España varias veces en torno a las 3 de la tarde y a las 3 de la madrugada. Durante las primeras cinco horas de vuelo el UPM-Sat 1 hubo de estar desactivado de acuerdo con los requisitos impuestos por Helios; transcurrido ese período, los diversos subsistemas del UPM-Sat 1 se activaron, entrando en servicio. Desde entonces se están manteniendo satisfactoriamente y con regularidad comunicaciones con el satélite cuando éste pasa por el área de cobertura de la estación de operaciones y control situada en Madrid. Se ha entrado ya en la etapa de explotación y análisis de los datos generados a bordo.

El UPM-Sat 1 nació como un proyecto fundamentalmente educativo, aunque con fuertes componentes científica y de desarrollo tecnológico, en el entorno del Laboratorio de Aerodinámica de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). La idea de diseñar, construir, integrar y operar un pequeño satélite en el que participaran profesores y alumnos de la UPM surgió como una extensión lógica de la experiencia espacial del grupo promotor: en el Laboratorio de Aerodinámica se trabaja desde 1975 para la Agencia Europea del Espacio (ESA) en la confección del manual oficial de control térmico de satélites de dicha Agencia (Spacecraft Thermal Control Design Data, ESA PSS-03-108), que ocupa actualmente unas 5000 páginas repartidas en 5 volúmenes.

Otro campo de relevancia espacial, iniciado también en 1975, tiene que ver con el comportamiento de los líquidos en condiciones de baja gravedad, programa en el que hay que contabilizar un número significativo de experimentos sobre puentes líquidos realizados a bordo del laboratorio espacial *Spacelab* (Misiones SL-1, 1983; SL-D1, 1985 y SL-D2, 1994) y en cohetes de sondeo TEXUS (1984, 1985, 1988, 1989, 1992, 1994); este programa científico tiene también su vertiente tecnológica: en 1992 se desarrolló para la ESA un módulo de experimentación con puentes líquidos en microgravedad simulada mediante la técnica de flotabilidad neutra.



1. Revisión de los paneles solares del UPM-Sat 1 durante el montaje del satélite en una de las salas limpias del Centro Espacial de la Guayana

En el proyecto UPM-Sat 1 han participado unas 75 personas repartidas entre profesores, alumnos y personal auxiliar de la ETSI Aeronáuticos, de la ETSI de Telecomunicaciones, de la ETSI Navales y de la EUIT Aeronáutica, y ha sido posible gracias a las subvenciones aportadas por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, por la Fundación Caja de Madrid en convenio con la Comunidad Autónoma de Madrid, por la propia UPM, y por la donaciones de materiales y servicios de ESA, CASA, CRISA, INTA, IBM y otras empresas e instituciones.

El UPM-Sat 1 tiene una masa total de 47 kg, incluido el sistema de separación, y su coste global ha sido de unos 210 millones de pesetas, incluido el lanzamiento. El satélite es de forma paralelepipédica, de 0,45 m × 0,45 m × 0,53 m, en cuyas caras laterales van montados cuatro paneles solares. La estructura está formada por cuatro bandejas de aluminio 7075 unidas entre sí mediante barras espaciadoras; en la bandeja inferior se alojan las baterías y las entrefases mecánica y eléctrica con el lanzador; la segunda bandeja soporta la caja de la electrónica, con las tarjetas de adquisición, tratamiento y control de datos, suministro y distribución de potencia, módem y transceptor; en la tercera están la carga útil nominal y los instrumentos para el control de actitud, y la cuarta sirve de cerramiento superior del satélite y en ella se aloja la antena de comunicaciones. El cerramiento lateral son cuatro paneles que sirven a su vez de soporte para los paneles solares (tres con células de silicio y un cuarto con células de arseniuro de galio) que proporcionan 1,3 ampère a 23 volt. En total son 696 células que suministran 20 watt (valor medio a lo largo de una órbita). El funcionamiento en los eclipses se asegura mediante dos juegos de 14 baterías de NiCd cada uno. El subsistema de potencia tiene capacidad para conmutar 20 cargas con los niveles de salida de 5, 24 y 30 volts. El sistema de potencia eléctrica incorpora también los dispositivos de control de los niveles de voltaje e intensidad, así como el control de protección y de carga de las baterías.

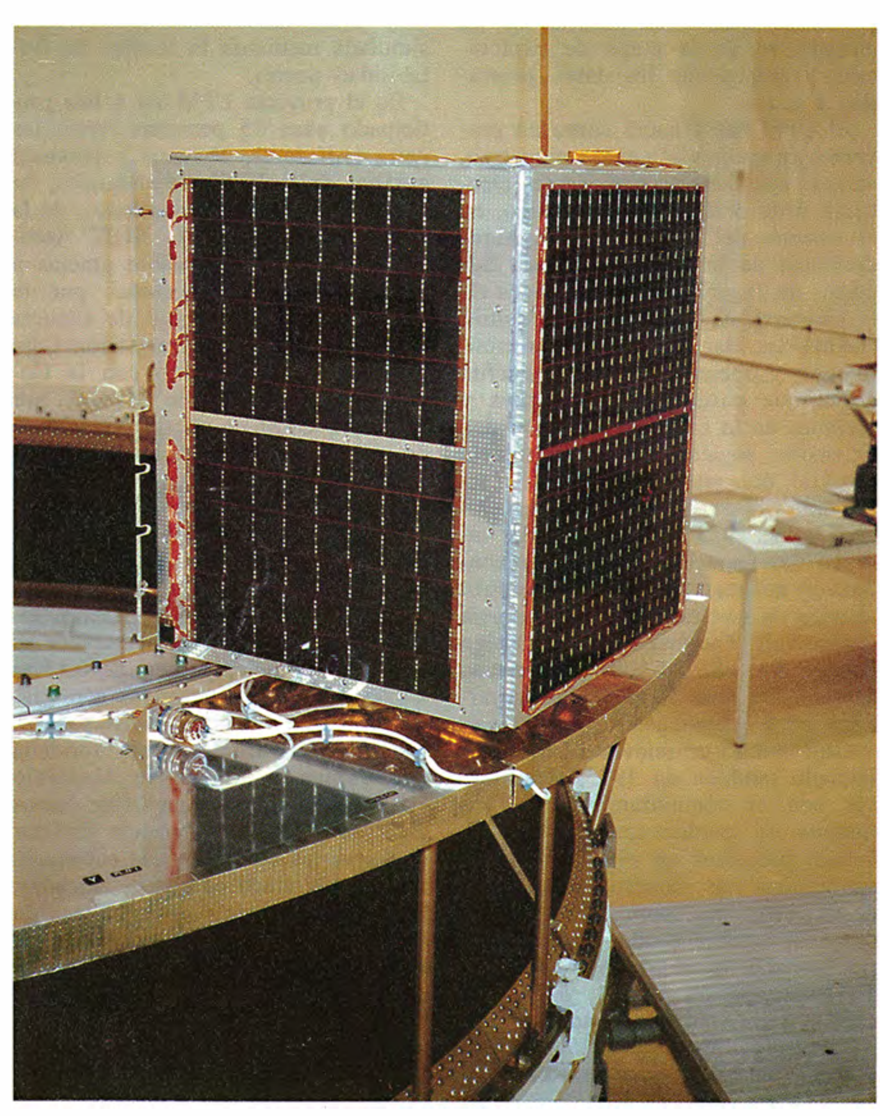
En el sistema de adquisición, tratamiento y control de datos se ha utilizado un procesador 80C31 a 7 megahertz, con 256 kbytes SRAM y 64 kilobytes EEPROM para los programas, reloj de vigilancia, 64 canales de ADC y 4 DAC. Las comunicaciones son asíncronas a 9600 bits por segundo. El UPM-Sat 1 dispone de un canal UHF para transmisión/recepción y una antena dipolo en la banda de 400 megahertz.

El control de actitud se realiza mediante 6 magnetopares de cobre dispuestos sobre las caras laterales del satélite. El sistema se completa con un magnetómetro de tres ejes que proporciona la información sobre la actitud del vehículo. El control térmico es pasivo, ayudado por la rotación del satélite; las caras superior e inferior del vehículo están recubiertas con mantas aislantes multicapa.

La carga de pago nominal es un experimento relacionado con el comportamiento de entrefases fluidas en condiciones de microgravedad; sin embargo, a lo largo del desarrollo del satélite esta carga fue perdiendo protagonismo en favor de otras cargas de contenido más técnico, de modo que al final el UPM-Sat 1 lleva también tres experimentos relacionados con nuevas tecnologías de paneles solares: el primero sobre nuevos interconectores de aluminio para paneles solares (en colaboración con DASA, Alemania, y ESA/ESTEC, Holanda, que suministró, a coste cero, uno de los paneles de células de silicio utilizados en el satélite), el segundo es sobre células solares de arseniuro de galio (en colaboración con FIAR, Italia, y ESA/ESTEC, que suministró, también a coste cero, el panel de células de arseniuro de galio) y el tercero sobre células solares de silicio de emisor profundo n+pp+ (en colaboración con el Instituto de Energía Solar de la UPM).

Con el UPM-Sat 1 ya en vuelo y funcionando según lo previsto, en la UPM se ha iniciando el desarrollo del UPM-Sat 2 MATIAS (*Mediciones Atmosféricas, Telecomunicaciones, Ingeniería y Aplicaciones de los Satélites*), un pequeño satélite de comunicaciones de mensajería y de observación de la atmósfera terrestre, y se está en la fase de definición de un satélite educativo pan-universitario (VENUS*: Vehicle for Education of the Network of Universities in Space*) en el que participarán junto a la UPM otras universidades europeas y americanas.

JOSÉ MESEGUER
CIDE/UPM, E.T.S.I. Aeronáuticos
Universidad Politécnica, Madrid



2. Vista del UPM-Sat 1, listo para vuelo, sobre la plataforma para satélites secundarios del Ariane IV. En la fotografía se ven los dos paneles solares experimentales aportados por la Agencia Europea del Espacio







Microgravedad

Resonancia en columnas

Durante la segunda misión alemana D2 del *Spacelab* en la primavera de 1993, se estudiaron columnas de fluido relativamente grandes, estables sólo en ausencia de gravedad. Los resultados de estas investigaciones son de interés para la navegación espacial y la ciencia de los materiales.

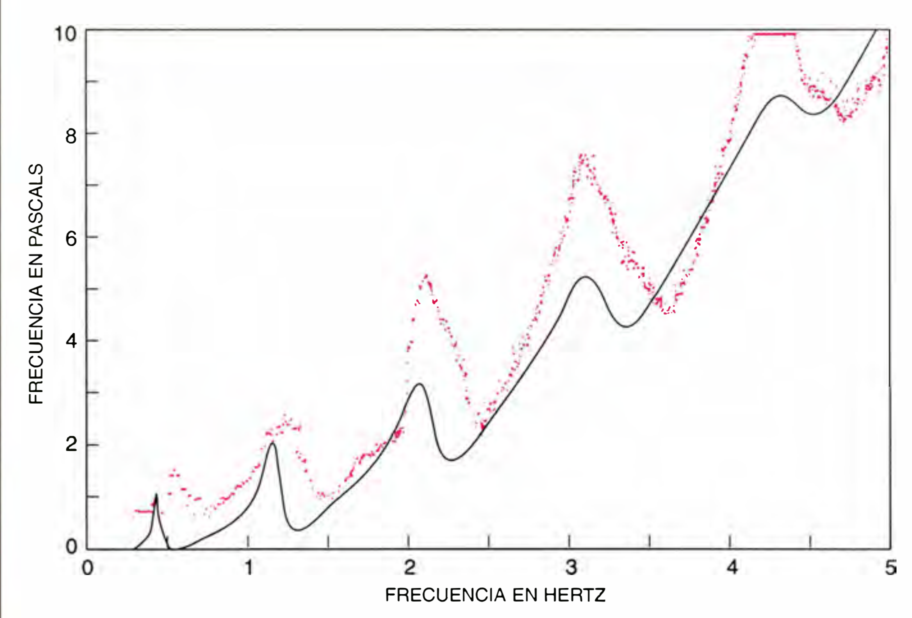
En condiciones terrestres, el peso de un fluido lo hunde en el fondo del recipiente que lo contiene. En condiciones de ingravidez, en cambio, son la geometría del continente y el ángulo que forma con la pared los que determinan la distribución del fluido en cuestión. Pueden, pues, observarse numerosas superficies de frontera en todo el recipiente. Los fluidos huyen sobre todo de las esquinas y las aristas, fenómeno a tener en cuenta en el revestimiento de los tanques de combustible y de refrigerante de las naves. Por eso el combustible de la lanzadera espacial debe hallarse siempre disponible junto a la abertura de salida del tanque para permitir maniobras precisas.

Otro problema crítico para la navegación espacial es el de las oscilaciones de resonancia de los fluidos. Los movimientos de un astronauta o de una simple bomba pueden provocar la oscilación periódica de cantidades mínimas de fluido, suficientes para desestabilizar la sonda espacial. Resulta de vital importancia poder predecirlas con exactitud.

El estudio del comportamiento de los fluidos reviste, además, particular interés en la investigación sobre materiales. Todos los procesos biotecnológicos y relativos a los materiales que pueden sacar partido de la ingravidez, trabajan con al menos un componente líquido. Son precisamente las fases líquidas las que experimentan la acción de la gravedad en sus formas típicas: convección, sedimentación y gradiente de presión fluidostática. Lo expuesto es aplicable lo mismo para la aleación de metales que para la obtención de cristales en zonas de fusión libres, experimentos estos realizados en condiciones de ingravidez.

En ese contexto nació el experimento LICOR (resonancias en columnas de fluido), en el marco de la segunda misión alemana D2 del *Spacelab*, de finales de abril a principios de mayo de 1993. Se centró en el estudio de las oscilaciones de resonancia en columnas de fluido.

En ese empeño trabajaron tres equipos: Universidad Politécnica de Madrid, Universidad del Ejército de Munich e Instituto Batelle de Frankfurt, que desarrollaron previa e independientemente modelos teóricos para el comportamiento oscilatorio de columnas de fluido. Las complejas relaciones matemáticas se simplificaron, en cada caso, de forma distinta, por lo que se obtuvieron valores del estado de resonancia ligeramente dispares.



1. Si se determina en función de la frecuencia la presión ejercida por una columna de fluido sobre las láminas en que se apoya, aparecen máximos periódicos correspondientes a la resonancia. La curva de valores experimentales de LICOR (puntos rojos) *coincide de una manera extraordinaria con la predicción* (en negro)

Con el complicado modelo que diseñamos mis colegas y yo en el Instituto Batelle se obtienen frecuencias de resonancia más altas que las previstas con la aproximación unidimensional de nuestros colegas de Madrid.

Hasta donde fue posible, se comprobaron en laboratorios terrestres los resultados de nuestros cálculos. Sólo se pueden obtener columnas de fluido aproximadamente cilíndricas si la gravedad ejerce escaso efecto sobre la tensión superficial, condición difícil de cumplir en el suelo. Hay que limitarse, por tanto, a columnas relativamente pequeñas o bien generarlas en el interior de otro fluido inmiscible con él y de densidad similar.

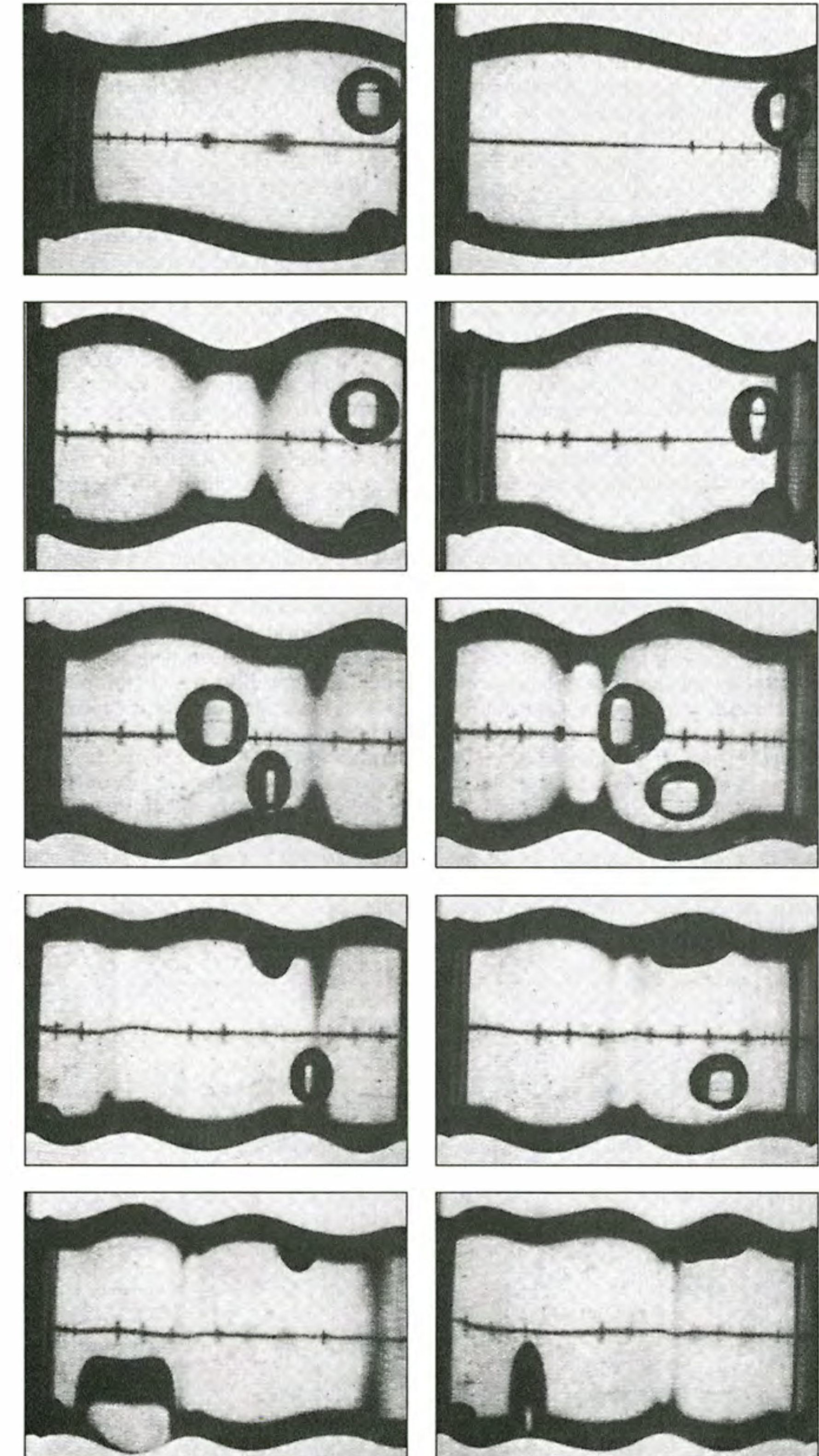
Conseguimos así columnas libres de hasta 5,5 milímetros de longitud y de 3 a 5 milímetros de diámetro situadas entre láminas circulares de acero fino de dimensiones correspondientes. Como líquidos se emplearon agua y una mezcla de agua y glicerina Un vibrador activó electrodinámicamente la lámina inferior con amplitudes de 2 a 6 micrometros (milésimas de milímetro) y frecuencias de 10 a 300 hertz.

La teoría y la valoración de los experimentos demostraron que la presión ejercida por la columna de fluido sobre las láminas circulares alcanza máximos en intervalos regulares, lo que se corresponde con la aparición de oscilaciones de resonancia. Las resonancias observadas en el caso del agua alcanzan valores menores que las que se obtienen con la mezcla de agua y glicerina. Los valores experimentales se aproximaron bastante a las predicciones del modelo.

Nos fue posible generar columnas de fluido cilíndricas mayores, rodeándolas de fluidos adecuados. Estudiamos de esta manera una columna de aceite de silicona de una densidad de 0,9 gramos por centímetro cúbico en un baño de agua y metanol.

La oscilación simultánea del fluido de envoltura, muy difícil de detectar, falsea los resultados en este tipo de diseños. Hay que tener en cuenta tanto la densidad y la viscosidad de dicho fluido como la forma del recipiente y el efecto de las láminas. Se ha observado, no obstante, que todas estas interferencias pueden reducirse a un factor de escala para las frecuencias.

La meta del experimento LICOR estribaba en ampliar las investigaciones a columnas mayores y en comprobar en qué medida eran correctos los modelos teóricos. Las pruebas tuvieron lugar en el Módulo de Física de Fluidos Avanzada (AFPM) situado en el laboratorio de materiales del *Spacelab* y fueron realizadas por



2. *Las imágenes, pertenecientes al experimento LICOR, muestran* (de arriba abajo) *las cinco primeras oscilaciones de resonancia de una columna de aceite de silicona de 30 milímetros de diámetro y 49,1 de longitud. Están sacadas de una filmación de vídeo que recogió el comportamiento de la columna de fluido conforme iba aumentando la frecuencia de las oscilaciones en la lámina circular. Cuando aparece el fenómeno de la resonancia, la columna se deforma de tal manera que llega a perder la transparencia debido al alto grado de refracción de la luz del aceite. La columna presenta ciertas burbujas que no se pudieron eliminar por cuestiones técnicas. (Fotografías cedidas por el autor, ZARM, Bremen.)*

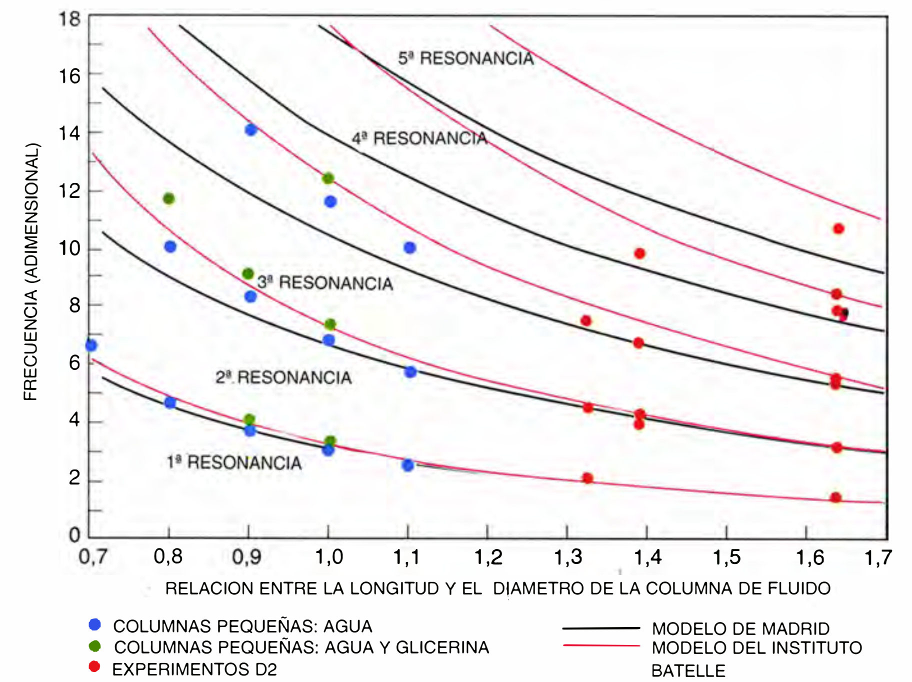
Ulrich Walter, un científico incorporado en la tripulación.

El conjunto instrumental se parecía al empleado en otros experimentos. Sólo las láminas circulares de 30 milímetros de diámetro eran sensiblemente mayores. Como fluido se escogió aceite de silicona. La amplitud de las oscilaciones observada fue de 1 milímetro y su frecuencia se aumentó automáticamente de 0 a 5 hertz, transcurrido un período de 7,5 minutos. Un sensor midió la presión que la columna de fluido oscilante ejercía sobre las láminas circulares al paso de esta rampa de frecuencia, y los aparatos electrónicos integrados se encargaron del cálculo de la amplitud y la fase de las oscilaciones que la originaba. Los valores se transmitieron inmediatamente a la estación terrestre. Fue vital que las mediciones de tiempo llegaran de manera inmediata al *Spacelab* a través de un sistema de conexión de vídeo y datos.

La primera columna tenía una altura de 47,4 milímetros. Cuando los valores de presión llegaron al centro de control terrestre en Oberpfaffenhofen y se compararon con la gráfica predicha por el modelo, el entusiasmo se podía apenas contener: la correspondencia era notabilísima. Las pequeñas desviaciones se deben a que la columna era menor de lo previsto y contenía además mayor número de burbujas, que no se habían podido eliminar. La repetición del experimento con una columna de 40 milímetros resultó también muy satisfactoria.

El AFPM se averió durante el desarrollo de los cuatro experimentos subsiguientes. No obstante, y gracias a la colaboración de los astronautas científicos, del equipo de tierra en el centro de control y, en especial, del equipo de apoyo del Centro Tecnológico Europeo del Espacio (ESTEC) de Noordwijk (Holanda), se pudo reactivar el módulo. El plazo estipulado para la misión D2 se aumentó de 9 a 10 días, lo que permitió la repetición de algunos experimentos del AFPM. Se escogió aceite de silicona de menor viscosidad, lo que motivó que la amplitud de activación se redujera a la mitad. En los experimentos anteriores se había desplazado lateralmente la lámina circular frontal, pero renunciamos a colocarla en su posición original porque el soporte electrónico ya había fallado con anterioridad.

Walter creó en esa ocasión una columna de fluido de 40 milímetros de longitud. Se observaron máximos de presión muy definidos y tales que permitieron la detección de las tres primeras frecuencias de resonancia. Debido al desplazamiento lateral de la lámina circular anterior, el fluido comenzó muy pronto a oscilar con tanta intensidad, que terminó por resbalar por la lámina posterior y la columna se disgregó.



3. Comparación de las frecuencias de resonancia predichas por los módelos teóricos con los resultados de los estudios con columnas de fluido pequeñas y con los del experimento LICOR de D2. La concordancia con el modelo teórico del Instituto Batelle de Frankfurt (curva roja) *es muy grande*

Pero el propio desplazamiento lateral de la lámina ofrece también datos interesantes sobre el alto grado de sensibilidad de la columna hacia perturbaciones no axiales. Es este un campo, el de las oscilaciones laterales de una columna de fluido, en el que se debería profundizar.

DIETER LANGBEIN
Centro de Astronáutica Aplicada y Microgravitación de Bremen

Caos mental

Psicoterapia no lineal

Los psicoterapeutas que opinan que la curación de la psique vendrá sólo del conocimiento se hallan a la defensiva. Por eso, unos cuantos ministros de la salud buscan vínculos entre las autoridades tradicionales que les han venido guiando —Freud en especial— e ideas más actuales (por no decir más de moda).

De ello han resultado reuniones del estilo del Primer Congreso de Mohonk Dedicado a la Psique Autoorganizada: Contribuciones No Lineales a la Teoría y la Práctica Psicoanalíticas, celebrado hace poco en una localidad turística del norte del estado de Nueva York. Unos 30 terapeutas y otros se pasaron un fin de semana discutiendo cosas tan esotéricas como el caos, la complejidad y la dinámica del no equilibrio. (Parafraseando a Louis Armstrong, si tienes que preguntar qué significa todo eso, nunca lo sabrás.)

Uno de los organizadores es Jeffrey Goldstone, psicólogo de la Universidad de Adelphi y presidente de la Sociedad para la Teoría del Caos en la Psicología y las Ciencias de la Vida, fundada hace un lustro. La razón del encuentro, dice Goldstein, es proporcionar a los terapeutas metáforas y analogías nuevas, no la manera de hacer que sus modelos de la mente adquieran rigor matemático.

Durante su disertación, Goldstein señala que Freud, influido por la física de su tiempo, creía que el analista tenía que ayudar a los pacientes a lograr una estabilidad, o equilibrio, mayores. Pero la teoría del caos apunta que muchos sistemas no logran nunca el equilibrio y atraviesan sin cesar una infinidad de estados diferentes. La buena nueva, añade, es que los sistemas caóticos, azuzados por fuerzas muy sutiles, pueden alcanzar formas superiores de "autoorganización". De la misma manera, sugiere, los terapeutas podrían inducir a los pacientes para que adquirie-

sen estados más saludables, más conscientes de sí.

Tras la presentación de Goldstein, varios de los asistentes se preguntan en voz alta si el objeto de la psicoterapia es inducir en los pacientes un estado de equilibrio o si no será más bien el de sacarles de él, y otro replica que demasiado equilibrio puede conducir a la parálisis mental y catatonía. El debate incita a uno de los presentes a recordar la advertencia de Ludwig Wittgenstein acerca del "encantamiento del lenguaje", su poder de oscurecer tanto como de iluminar.

Alan Stein, psicoanalista radicado en Manhattan que ayudó a Goldstein a organizar el congreso, examina ciertas analogías entre la teoría neofreudiana y las ideas de la ciencia no lineal. En una ocasión, Stein, mientras habla de lo que llama condición PE (de paranoide-esquizoide), dice "BE" en vez de "PE". Aunque se corrige inmediatamente, varios de los que le escuchan desde el fondo de la sala intercambian miradas significativas. ¿Puede un psicoanalista convencer a una sala repleta de psicoanalistas de que su lapsus verbal es sólo eso, un mero lapsus?

Con todo, el público parece fascinado por la tesis de Stein. La lección de la ciencia no lineal, opina, es que nadie puede en realidad "conocer" a alguien, pues la mente no deja de oscilar entre estados diferentes; tampoco puede el analista estar seguro de cómo afectarán sus buenos oficios a un paciente, pues causas minúsculas pueden tener consecuencias enormes e impredecibles. Pero reconocerlo, dice Stein, quizá vuelva más humildes a los terapeutas y, por tanto, les haga, paradójicamente, más eficaces a la hora de ayudar a sus pacientes.

Uno de los asistentes pregunta si un terapeuta podría ayudar a un paciente simplemente no haciendo o diciendo nada. Stein asiente. Tras la reunión, tanto Goldstein como Stein dijeron estar satisfechos con la manera en que habían salido las cosas. Reconocen que los responsables de la atención dirigida podrían recibir con escepticismo la terapia inspirada en el caos por la que abogan. ¿Sólo ellos?



Tener en cuenta la teoría del caos podría ayudar a los psicoterapeutas a comprender mejor la mente, según Jeffrey Golstein, de la Universidad de Adelphi

JOHN HORGAN

Imagen de la bahía oscura

Escudriñar pecios en las lóbregas profundidades había sido, hasta hace muy poco, un negocio turbio. Pero un nuevo refinamiento incorporado en los sensores submarinos, el explorador láser de líneas, está aclarando las cosas. La construcción de imágenes bajo el agua queda dificultada por las partículas en suspensión que difunden la luz como una densa niebla: véase como ejemplo la fotografía de un avión bombardero-torpedero que quedó sumergido durante la II Guerra Mundial (*izquierda*). Esta limitación restringe la fotografía submarina a primeros planos y hace difícil captar grandes objetos.

El nuevo sistema evita este problema, produciendo imágenes netas del mismo bombardero (*derecha*). El instrumento óptico usa un láser azul verdoso para explorar el objeto línea por línea, de manera muy parecida a como lo hace el haz de electrones del tubo-pantalla de un televisor. La luz azul verdosa penetra en el agua del mar más eficazmente que otros colores, y como la iluminación se concentra en un barrido delgado y único, no es retrodifundida desde todas las direcciones, como ocurriría con la luz de las fuentes habituales.

DAVID SCHNEIDER





Fotos: Xavier Ferrer y Adolfo de Sostoa
Texto: Xavier Ferrer

La carrera de la vicuña

La vicuña (*Vicugna vicugna*) es un camélido andino de cuerpo esbelto, largo cuello y extremidades ligeras. Lo mismo que la llama y la alpaca, la vicuña está perfectamente adaptada a la vida en las alturas. Mora entre los 3700 y los 5000 metros de altitud. Se lo permiten su corazón desarrollado y una sutil adaptación en el funcionamiento de los tejidos a baja presión de oxígeno. Los glóbulos rojos, achicados y forma ovoide u elíptica, ofrecen una mayor facilidad para la difusión del oxígeno.

Correr a 4000 metros de altitud en la puna, el semidesierto de gramíneas del altiplano andino, es todo un reto. La concentración de oxígeno allí reinante es casi la mitad que a nivel del mar; por eso, cualquier movimiento, hasta el más liviano, sofoca al recién llegado. Salvo para las vicuñas, que van a la carrera sin esfuerzo visible y poseen una envidiable capacidad de resistencia. Lo pudimos comprobar en Surire (Chile). Se iba a realizar un arreo de vicuñas para la esquila, dentro del plan de estudio de esta especie. Nos aproximamos con un todoterreno. Sabíamos, por los libros, que corren a 40-50 km/h. Se quedan cortos. Nuestro cuentaquilómetros llegó a marcar 70 km/h a 4200 m de altitud. Las fotografiamos desde la ventanilla, en un salar muy liso. Usamos teleobjetivos cortos, enfoque automático y disparo a ráfagas. Los grupos familiares en reposo los conseguimos en la misma zona, mediante teleobjetivos de 200 a 500 mm.







Los yacimientos de Atapuerca

Los depósitos de antiguas cuevas en la sierra burgalesa de Atapuerca contienen un tesoro singular de datos arqueológicos, paleontológicos y paleoclimáticos del Pleistoceno Medio

Emiliano Aguirre

La sierra de Atapuerca forma un arco de poco más de 45 grados, al este-noreste de Burgos. Su cumbre, aplanada por la erosión, se eleva a 1080 metros. En su mitad meridional presenta un sistema kárstico, que permaneció incomunicado con el exterior hasta finales del Pleistoceno Inferior. Las cavidades se convirtieron entonces en cuevas.

Se han catalogado y topografiado 25 cavidades. Nueve de ellas son cuevas con más de 20 metros de recorrido. Cueva Mayor y Cueva del Silo, conectadas, tienen más de 3 kilómetros. En media docena de puntos de la sierra se hallan expuestos depósitos de relleno. Algunas series de depósitos de cuevas fueron cortadas por una trinchera de ferrocarril, a caballo entre los términos de Atapuerca e Ibeas de Juarros.

Empezamos la excavación sistemática de tres depósitos de relleno en 1980. Se denominan: Gran Dolina, Galería y Covacha de los Zarpazos, en Atapuerca. A ellos hemos de añadir, desde 1985, la Sima de los Huesos, en Ibeas.

En Gran Dolina, se distinguen sucesivos niveles, que numeramos, de abajo arriba, con las siglas TD del 1 al 11.

El nivel TD.1 consiste en limos finos. Se redepositaron en condiciones endokársticas (de cueva cerrada).

El TD.2 consta de brechas caóticas con grandes bloques caídos del techo y trozos de estalactitas. Al tiempo de depositarse, la cubierta vegetal tenía enebros en las laderas, pinos y abedules en los valles; la meseta constituía un páramo, todo ello según el polen analizado por Mercedes García Antón. Hacía frío y la humedad decaía progresivamente. Pudieron también influir en los derrumbes de TD.2 movimientos sísmicos debidos a una reactivación tectónica. Al final de la deposición de TD.2, la cueva estaba prácticamente cerrada. Con ello se formó una costra caliza, de cristales paralelos "en empalizada", en lo alto del lecho TD.2 y en la superficie de los cantos y bloques caídos, que quedan así cementados.

Los limos arrastrados por aguas de arroyada del lecho TD.3 no contienen polen. Sí hay restos de roedores y otros pequeños vertebrados. La temperatura había aumentado. También aumentó la humedad. La cueva se abrió al exterior. Al final de ese período, cayeron al fondo algunos grandes animales, gamos en particular.

La capa TD.4 está formada por brechas de derrumbe, con bloques desiguales, angulosos, de caída libre, que indican la acción de fuertes heladas. Los huecos se rellenan con arcillas grises. Entre dos tandas de bloques amontonados, y sobre la segunda de ellas, hay lechos irregulares de cantos. Indican un tiempo menos frío y más húmedo. Estos depósitos contienen restos de fauna abundantes. De las pautas de rotura y digestión de los huesos de roedores, Yolanda Fernández Jalvo infiere la presencia del búho chico. El nivel TD.4, que representa un episodio frío global, está medio hundido, erosionado. La flora del momento final de ese nivel se compone de encinas o alcornoques, robles, hayas, pinos, y acebuches: un bosque templado y húmedo. La presencia de seres humanos en esta edad se atestigua por varios artefactos de piedra, de escasa elaboración. La acumulación de huesos podría deberse principalmente a carroñeros o a caídas por torca; las modificaciones de los recursos por los humanos serían aquí escasas.

La primera parte de la capa TD.5 consta de microconglomerados que alternan con lechos de bloques derrumbados; la matriz es arenoso-arcillosa. Hay arcilla rojiza en lechos y adherida a los cantos de grava. La parte alta se cementa con carbonato. Ha habido, según M. Hoyos, calor y aridez creciente, que se han alternado con intervalos de heladas invernales. En los horizontes siguientes del estrato TD.5, que alcanza en total 3 metros, se acusa el frío intenso con bloques caídos del techo por fuertes heladas. Las muestras de polen de esta fase fría correspondiente a los horizontes superiores, algo más húmeda, revelan un bosque de encinas abierto, pobre, sin especies templadas. De la fauna casi sólo conocemos los pequeños vertebrados. Entre ellos, Borja Sanchiz y Enrique Gil reconocieron un anuro acuático del género *Triturus*, además del sapo común, el sapo corredor, una rana y otro sapo (*Pelodytes punctatus*), la serpiente de vidrio, la víbora, la coronela y otras serpientes, entre ellas el tropidonoto de collar acuático, lagartos y lagartijas; la *Beremendia*, una musaraña extinguida, y una fauna de roedores muy parecida a la del nivel TD.4. El cárabo es reconocido por Y. Fernández Jalvo como el predador más común.

En la parte final de TD.5 un paquete de arcillas rojas son producto característico de un clima cálido continental con pocas lluvias y muy alta evaporación en estación cálida. No contienen polen, pero sí abundantes fósiles de roedores. Se han sucedido, pues, en TD.5 un episodio templado, uno frío y otro cálido, con dos crisis de aridez.

El estrato TD.6 alcanza más de dos metros y medio de arenas arcillosas, depósitos de escorrentía estacional y láminas de agua, interrumpidas por más de tres lechos de bloques derrumbados por acción intensa del hielo. El último frío parece menos riguroso, y en toda la segunda mitad el clima es más tibio, con

EMILIANO AGUIRRE dirigió, entre 1978 y 1990, las excavaciones de Atapuerca. Ha sido catedrático de las universidades de Zaragoza y Madrid, además de profesor de investigación del CSIC.

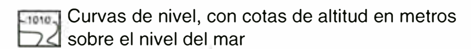


Zonas de intervención hasta el presente

GD Serie de depósitos pleistocenos de relleno estratificados en Gran Dolina

CTS Serie de depósitos pleistocenos del Complejo Tres Simas

SH Sima de los Huesos con yacimiento principal de fósiles humanos



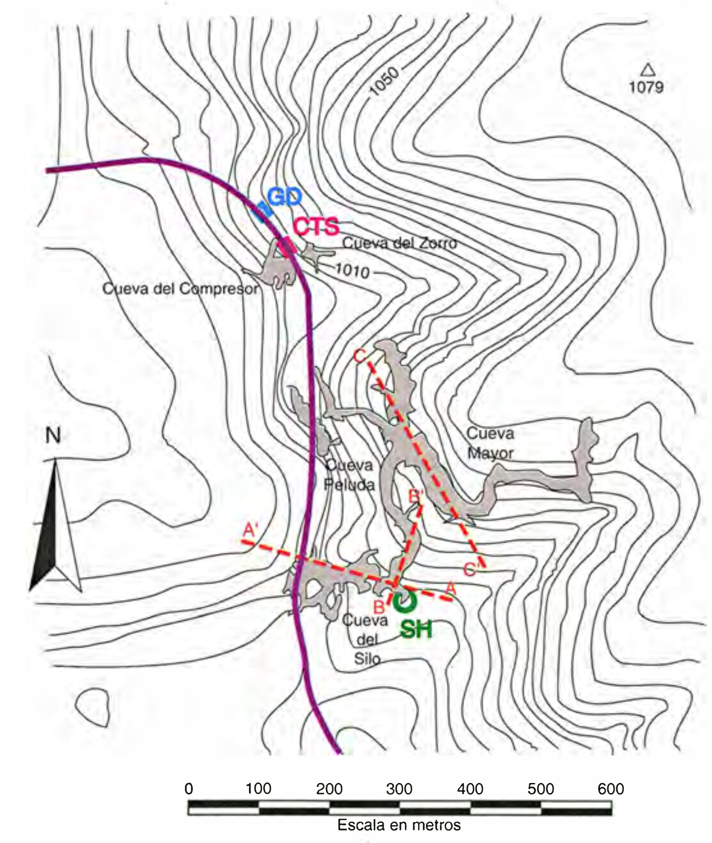
Curvas de nivel, con cotas de altitud en metros sobre el nivel del mar

Línea de antiguo ferrocarril minero, hoy desmantelado

Plano de cuevas actuales o cavidades residuales proyectado sobre el mapa de superficie

A'...A Dirección de los cortes

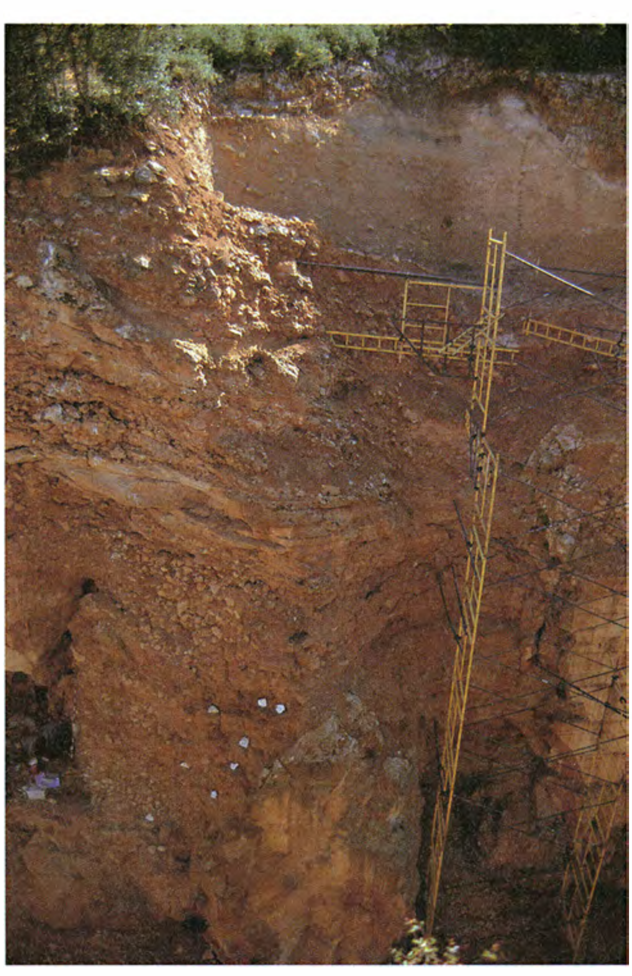
△ Cota superior de la Sierra de Atapuerca



1. MAPA DE SITUACION DE LOS YACIMIENTOS parcialmente excavados entre 1980 y 1995 en depósitos pleistocenos del karst de Sierra de Atapuerca. Tomado de los mapas facilitados por servicios del Ejército, y planos de las cuevas por el Grupo Espeleológico "Edelweiss" de Burgos. En la foto de M. Bautista, Sierra de Atapuerca al fondo; delante, el Arlanzón.

mayor índice de humedad, aunque fluctuante, y hay fases de reasentamiento. Sigue siendo variada la representación de anfibios y reptiles. El contenido de polen indica un cambio en la cubierta vegetal que corresponde a lo deducido de la secuencia sedimentaria: al encinar pobre del tercio inferior con manchas de pinos y enebros, con no más del 40 % de polen arbóreo, sucede al final una muestra con 60 % de polen arbóreo, que incluía robles o quejigos, pinos, abedul, algarrobo, acebuche y el lentisco. En la excavación de 1994 se han hallado fósiles humanos e industria.

En los niveles TD.3, TD.4, TD.5 y TD.6, esto es, hasta la mitad del relleno de Gran Dolina, se reconocen entre 35 y 40 especies de mamíferos fósiles. Algunas son triviales, pues duran todo o casi todo el Pleistoceno Medio. Otras sólo se conocen entre hace 850.000 años y 500.000 años: representan un conjunto faunístico que dura el final del Pleistoceno Inferior y el primer tercio del Pleistoceno Medio. Estos taxones son: un insectívoro (*Beremendia fissidens*), dos topillos (*Stenocranius gregaloides* y *Terricola arvalidens)* más otro roedor afín, todavía con raíces en sus muelas (*Mimomys savini*), la hiena manchada primitiva (*Crocuta crocuta intermedia*) y un cérvido de afinidad incierta (*"Cervus" elaphoides*). A éstos se añaden otros conocidos en etapa temprana del Pleistoceno Inferior y que se extinguen hace más de medio millón de años, como son el roedor *Allophaiomys chalinei*, el rinoceronte etrusco y el ciervo *Cervus elaphus,* muy común hasta la actualidad, pero desconocido antes de hace 850 Ka.



2. EL CORTE GRAN DOLINA expone 20 m de depósitos estratificados. Desde hace un millón de años hasta colmatar la cueva hace cien mil, guardan vestigios humanos y del entorno.

Contemporáneamente, en Europa medran además los équidos primitivos *Equus altidens* y *E. süssenbornensis* (faltan por identificar los de Gran Dolina), y el mamut meridional progresivo, al que sustituye, hace no mucho más de 700 Ka, el mamut de estepa (*Mammuthus trogontherii*), identificado en TD.6.

Entre los yacimientos europeos que presentan este conjunto faunístico se cuentan Solilhac, Akhalkalaki y Betfia 5, fechados en torno a los –850 Ka. Más jóvenes, aunque todavía anteriores a la inversión del polo magnético Matuyama/Brunhes, que ocurrió hace alrededor de 750 Ka, son los yacimientos de Zalesiaki 1A, Villany 8 y parte de Somssish-hégy, y quizá Huéscar 1. Más recientes, posteriores a ese dato, son Cúllar-Baza, Voigstedt y Gombasek. Yacimientos de existencia más cercana a nosotros en el tiempo son los de Prezletice, Stranska Skala, Süssenborn, Kozi-Grzbiet, Kolkotova Balka, y West-Runton en su tramo fresco (Cromer II); éste precede al Cromer III, cálido, y el cambio se data en 515/520 Ka, como el paso entre los episodios 14 y 13 de la escala paleotérmica del océano. Fue pues un conjunto faunístico muy estable.

Otros taxones originados más o menos al tiempo que los anteriores, y que perviven hasta hace unos 400.000 años, excepcionalmente hasta 350 Ka, son un ratón de campo (*Pliomys episcopalis*), una pantera (*Panthera gombaszoegensis)*, un lobo primitivo (*Canis mosbachensis*), un antecesor del perro jaro (*Xenocyon lycaonoides)*, un antecesor del oso de las cavernas (*Ursus deningeri*), un gran paleto primitivo (*Praemegaceros verticornis)* y un bisonte parecido a *Bison schoetensacki.*

Estos últimos, junto con otros de nueva aparición y que desaparecen antes de 400/350 Ka, como son un ratón de campo (*Arvicola cantiana)*, un caballo (*Equus mosbachensis*), el *Hemitragus bonali*, el bovino gigante (*Bos trocheros*) y un hipopótamo, caracterizan un grupo de sitios europeos que contienen, además de los grupos de fósiles mencionados, otros que van a perdurar por lo menos hasta el final del Pleistoceno Medio. Estos son: un roedor (*Pliomys lenki)*, varios topillos (*Terricola subterraneus*, *Microtus arvalis* y *agrestis*, *Iberomys bracciensis*), el león, el zorro, el rinoceronte de estepa, el rinoceronte de Merck y cierto bisonte (*Bison priscus)*.

Entre los yacimientos que contienen esta rica y cambiante paleofauna, y con una fecha aproximada entre los 460 y 400 millones de años atrás, se cuentan: Mosbach 2, Mauer, Westbury, Belle-Roche, L'Escale, Lunel-Viel, Fontana Ranuccio, Cava Pompi, Visogliano y Arago. Todos ellos se distribuyen entre los episodios 13 y 12, respectivamente cálido y frío, de la escala isotópica del océano. Esta etapa de cambio faunístico se termina en el episodio 11 de la escala paleotérmica de isótopos del oxígeno, y es probablemente la edad de la Sima de los Huesos con fósiles humanos. En Gran Dolina faltan depósitos de esos tiempos tras ocluirse la cueva en TD.8.

El nivel TD.7 de Gran Dolina tiene más de 2 metros de depósitos de tipo fluvial y encharcado. Una abertura al oeste actuaba como sumidero. Las lluvias eran estacionales y torrenciales. La evaporación se acentuó en crisis de sequía, y las gravas y limos se acabaron cementando con precipitado de carbonatos. Una muestra de polen revela un bosque mediterráneo abierto, propio de clima templado, con vid y olivo y hayas en las alturas próximas.

Las caídas de bloques del techo y paredes de la cueva a comienzo y a lo largo del nivel TD.8 indican frío intenso. Alternan con depósitos de

intervalos tibios. La humedad crece y hacia el final se hace constante. Los depósitos se van erosionando y hundiendo hacia el centro-este de la cavidad; la entrada se ocluye con los derrumbes. Con la fase cálida que sigue y la humedad oscilante, una costra caliza recubre el cono de derrubios final de TD.8 y cementa sus bloques.

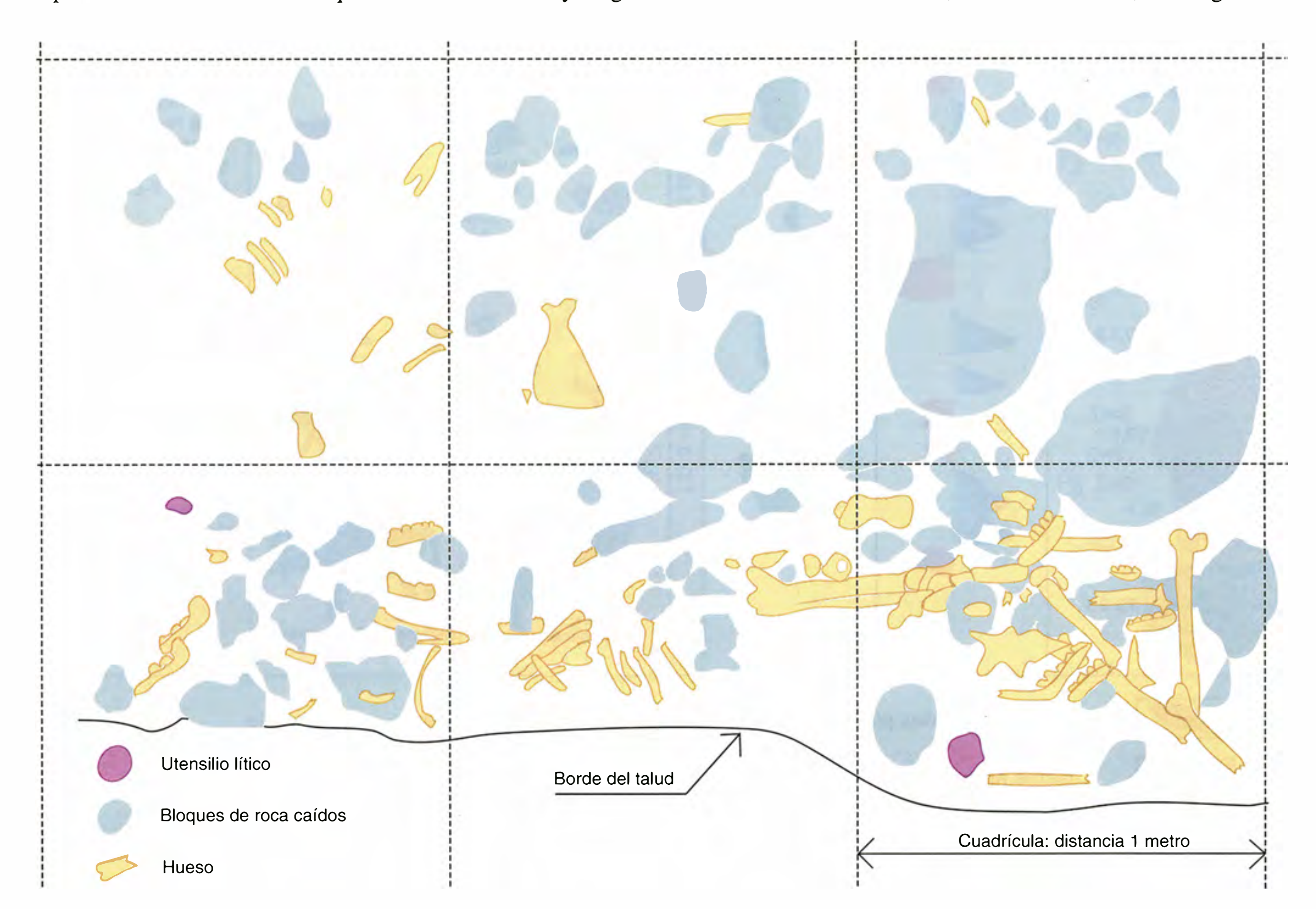
Sigue, también en régimen templado y de humedad variable, un depósito de limos por láminas de aguas filtradas, en TD.9, bajo los cuales cede el margen final de la costra, y así se acumulan en la parte hundida. Parece verosímil la correlación de esta última fase cálida con el episodio isotópico 11.

Después sobrevienen nuevos derrumbes: los bloques muy angulosos denuncian un clima muy frío en la parte inferior del nivel TD.10, poco húmedo al principio y más, al final. El resto de TD.10, que llegó a tener más de 3 metros después de erosionado y compactado, es una sucesión de lechos arcillosos rojizos, a veces con cantos arrastrados; otras veces se interponen montoncillos de bloques caídos del techo, o lentejones de grava caliza. Revelan un clima continental, benigno con humedad estacional, heladas en invierno y veranos calurosos. Se abre de nuevo a un lado y al techo la cavidad, y funciona como una dolina. Luego, el techo se desploma en parte y retrocede con la erosión de la ladera, de modo que una parte externa de la cavidad queda expuesta y el resto permanece como un amplio y profundo abrigo. La sedimentación se interrumpe y se reanuda once veces. Utensilios líticos y restos de talla, más o menos dispersos o concentrados, evidencian actividad intensa de pobladores humanos.

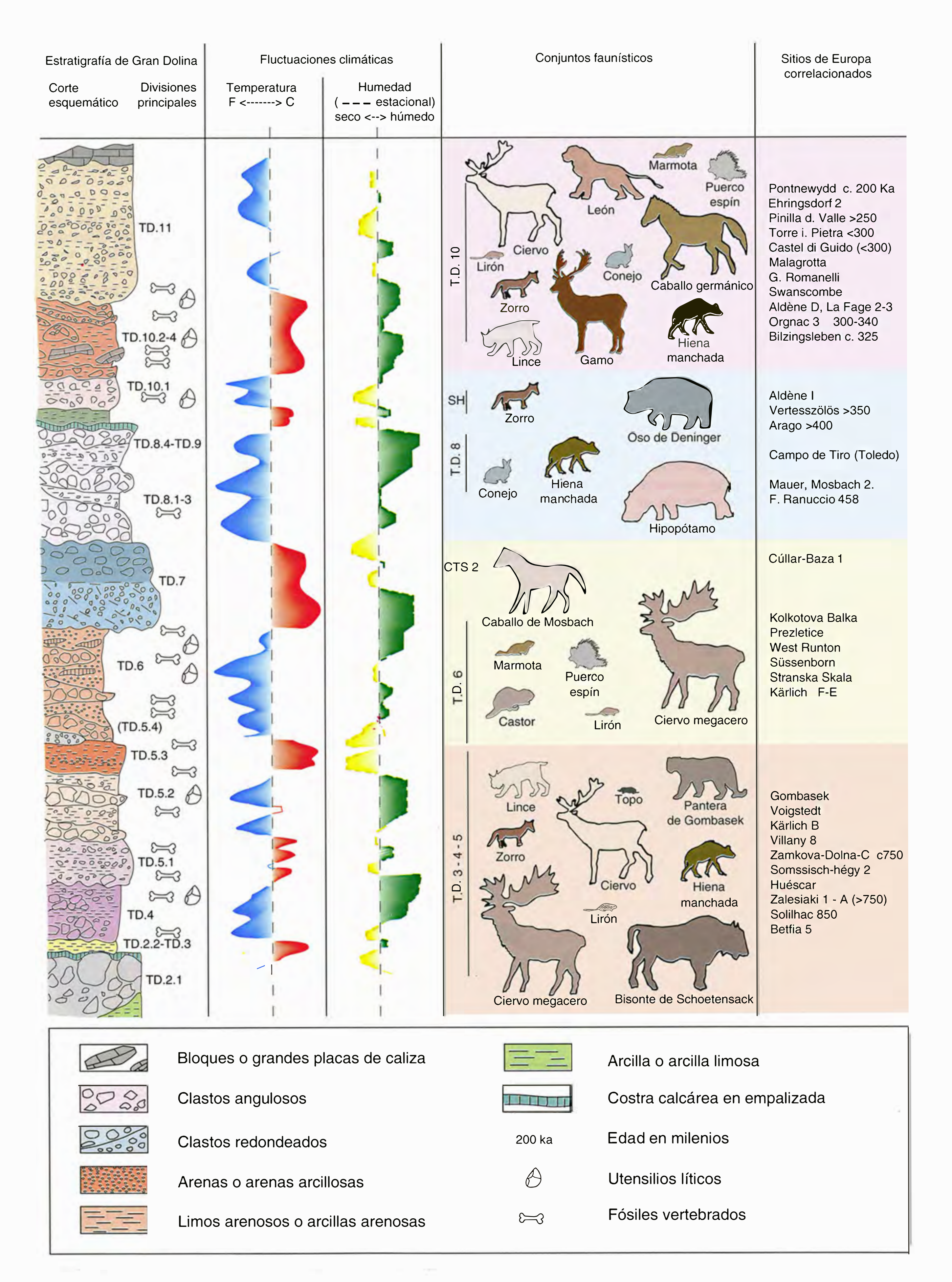
El límite superior del estrato TD.10 que sirve de base a TD.11 está muy inclinado, y desdibujado por la erosión y por deslizamientos de los materiales altos de TD.10: es época de alto índice de humedad, que torna a decaer.

El nivel TD.11 se empobrece pronto en restos fósiles. Hasta 4 metros de finas capas de grava angulosa, con grandes bloques caídos a intervalos, indican uno o más períodos de clima muy riguroso. Termina con gravillas y arenas que llegan hasta el techo de la cueva residual, a veces de pocos decímetros, edafizado y sostenido por el relleno. El calor y fuerte evaporación cementan luego con carbonatos este depósito. La parte más expuesta al exterior acusa alteraciones edáficas por fluctuaciones más modernas del clima.

Los taxones de mamíferos que caracterizan los conjuntos faunísticos de TD.10 y base de TD.11 son: *Pliomys lenki,* un topillo (*Terricola subterraneus*), un ratón de campo (*Arvicola sapidus*, o *terrestris*), un lobo (probablemente *Canis lupus)*, un oso moderno (probablemente *Ursus arctos)*, el rinoceronte de estepa, el caballo de Taubach, además del zorro, el ciervo común, un gamo, un gran paleto y un gran bovino. Esta es la fauna, más probable, que se encuentra en otros yacimientos europeos de hace entre 300.000 y 200.000 años: Bilzingsleben, Orgnac 3, Aldène D, La Fage 3, Grotta Romanelli, Malagrotta, Castel di Guido, Pinilla del Valle, Solana del Zamborino, Swanscombe, Torre in Pietra, Ehringsdorf



3. PARTE DEL PLANO, según Juan Carlos Díez, de uno de los diez horizontes sucesivos excavados en la mitad inferior de la unidad superior del relleno de la Galería de Atapuerca. Se ve una paletilla de bisonte hacia el centro, fragmentos de hueso dispersos, un montón de huesos de caballo y de bisonte en un cuadrado a la derecha que corresponde al talud de depósitos entre la torca y la galería, y utensilios líticos. Los humanos comían entonces carne de bestias caídas en torcas.



Estratigrafía de Gran Dolina
Corte esquemático
Divisiones principales
Fluctuaciones climáticas
Temperatura F <-------> C
Humedad (– – – estacional) seco <--> húmedo
Conjuntos faunísticos
Sitios de Europa correlacionados
TD.11
TD.10.2-4
TD.10.1
TD.8.4-TD.9
TD.8.1-3
TD.7
TD.6
(TD.5.4)
TD.5.3
TD.5.2
TD.5.1
TD.4
TD.2.2-TD.3
TD.2.1
T.D. 10
Ciervo
León
Marmota
Puerco espín
Lirón
Conejo
Caballo germánico
Zorro
Lince
Gamo
Hiena manchada
SH
T.D. 8
Zorro
Oso de Deninger
Conejo
Hiena manchada
Hipopótamo
CTS 2
Caballo de Mosbach
T.D. 6
Marmota
Puerco espín
Castor
Lirón
Ciervo megacero
T.D. 3 - 4 - 5
Lince
Topo
Pantera de Gombasek
Zorro
Ciervo
Hiena manchada
Lirón
Ciervo megacero
Bisonte de Schoetensack
Pontnewydd c. 200 Ka
Ehringsdorf 2
Pinilla d. Valle >250
Torre i. Pietra <300
Castel di Guido (<300)
Malagrotta
G. Romanelli
Swanscombe
Aldène D, La Fage 2-3
Orgnac 3 300-340
Bilzingsleben c. 325
Aldène I
Vertesszölös >350
Arago >400
Campo de Tiro (Toledo)
Mauer, Mosbach 2.
F. Ranuccio 458
Cúllar-Baza 1
Kolkotova Balka
Prezletice
West Runton
Süssenborn
Stranska Skala
Kärlich F-E
Gombasek
Voigstedt
Kärlich B
Villany 8
Zamkova-Dolna-C c750
Somssisch-hégy 2
Huéscar
Zalesiaki 1 - A (>750)
Solilhac 850
Betfia 5
Bloques o grandes placas de caliza
Clastos angulosos
Clastos redondeados
Arenas o arenas arcillosas
Limos arenosos o arcillas arenosas
Arcilla o arcilla limosa
Costra calcárea en empalizada
200 ka
Edad en milenios
Utensilios líticos
Fósiles vertebrados

y Pontnewidd. Pervive, pues, durante los episodios isotópicos cálidos 9 y 7. La vegetación en TD.10 superior pasa de bosque mixto templado, más o menos húmedo, a pinar, al final, de clima más crudo.

Según lo que precede, los límites cronológicos de la secuencia de la Gran Dolina en Atapuerca serían los 900/850.000 años antes del actual por la base y unos 290.000 o 180.000 aAA en lo alto: un registro de 600 milenios. J. M. Parés ha registrado polaridad magnética inversa a la actual entre TD.3 y TD.7. Es el final de la época Matuyama tras la que vuelve el norte magnético al polo actual. El tramo TD.3-TD.7 va pues de hace 900 a 750 milenios, sólo la primera parte de la biozona *Mimomys savini* y *Stenocranius gregaloides*, y la sedimentación en Gran Dolina tuvo grandes lagunas entre hace 750 y 400 milenios.

Otro sitio excavado en la trinchera, a 30 metros del anterior, es la Galería, en el Complejo Tres Simas. El corte de la trinchera del ferrocarril vino a seccionar a lo largo de unos 10 metros un conducto de techo bajo que comunicaba, por un extremo, con el fondo de una cueva de abertura hoy taponada en la ladera, y, por el otro, con una de tres chimeneas verticales —las "Tres Simas" o dolinas— que convergen hacia el fondo del sistema.

Se ha excavado hasta ahora en una de las simas (la más septentrional) y la galería en que ésta desemboca tras un descenso de más de 6 metros en la chimenea. Al otro lado de la galería, se preparó la excavación de una pequeña sala abovedada de planta elíptica, evacuando dos metros de limo estéril bajo una estalagmítica costra, y excavando una capa superior fértil en huesos. Una calicata revela que hay estratos más ricos en profundidad. Aquí se halló, entre otros, el oso de las cavernas (*Ursus spelaeus*), del que hay, además, huellas de garras en una pared: de ahí se llamó a este recinto Covacha de los Zarpazos.

En el Complejo Tres Simas los sedimentos de la unidad inferior son limos de cueva cerrada, sin restos de fauna ni flora. Contienen una costra caliza de más de 360.000 años. Al final se forman depósitos de murcielaguina, la primera señal aquí de abertura de estas cavidades al exterior. Siguen bolsas de arcilla roja y brechas en parte cementadas. Estas últimas contienen restos de fauna con el caballo de Mosbach y roedores de carácter relativamente moderno. Corresponden a una oscilación climática de fría a cálida que se puede correlacionar con el estrato TD.7 de Gran Dolina. Por este lado de las Tres Simas hubo una abertura de acceso en esta época. Por la galería se extiende a continuación el que se llamó nivel TG.10, coladas de barro que arrastran bloques, huesos y artefactos desde la Covacha de los Zarpazos. Por el otro lado, el de las "simas", entran brechas y bloques en capas sucesivas: representan una fase fría, luego benigna y con humedad creciente. Sigue una fase cálida marcada por una fuerte acción erosiva.

Tras una discordancia notable en la sima, y un encharcamiento en el centro de la galería, adonde llegan dos coladas de barro y huesos por el lado de la Covacha, suceden en secuencia rítmica una decena de lechos de grava y limo, en una tercera unidad del Complejo Tres Simas, que inicialmente se designó como TG.11. En esa secuencia se reconocen otros tantos horizontes con huesos desparramados e industria; y abundan los fósiles de aves (A. Sánchez Marco reconoce 28 especies distintas).

Los depósitos del tramo TG.11 llegan al centro de la Galería desde ambos lados, de la Covacha y de la Sima. Por el lado de la Sima se había cegado la primitiva entrada en el episodio anterior, pero no tardó en abrirse la chimenea vertical a la superficie en forma de torca, o pozo. Por aquí caían reses como en trampa natural. A los mamíferos citados en TD.10-11, se añaden en este tramo superior de TG.11: el perro jaro, el lobo, el oso de las cavernas, un puerco-espín (*Hystris vinogradovi*), una variedad de lince (*Lynx pardina*) y el gato montés, presente ya en niveles más antiguos.

Un muestreo para buscar polen a través de los niveles TG.11 y TG.12 indica, abajo, un rico bosque templado, que coincide con el máximo de humedad inferido de la acción geológica y con la diversidad de aves ripícolas y habituales de charcas o sitios húmedos. Sigue un empobrecimiento del bosque y de la fauna de aves representada; luego, una recuperación de bosque templado pero de menor humedad. A ésta sucede, en TG.12, una flora como la de los páramos ibéricos, esteparia, pobre en gramíneas y en árboles, salvo algunas manchas de pinar en que vivió la perdiz. Al final, sucede un bosque de tipo mediterráneo, que corresponde a un episodio cálido, con más evaporación.

La correlación de los tramos TG.11-TG.12 con las capas TD.10 y parte inferior de TD.11 es muy verosímil, tanto por la secuencia climática inferida de los procesos morfosedimentarios, como por la composición faunística.

Dos diferentes edades se han asignado a la costra terminal de los depósitos de la Galería y la Covacha de los Zarpazos. La edad de espín electrónico, en torno a 200.000 años, es coherente con la atribución de los conjuntos faunísticos de TD.10 y T.11 al episodio 9. La edad de isótopos del uranio, en torno a 100.000



4. EN COMPLEJO TRES SIMAS (*foto*) faltan los depósitos más antiguos. Los inferiores de aquí representan tramos que faltan en Gran Dolina. La deposición es desigual en cavidades distintas. Los diversos cortes de Atapuerca se complementan.

años, obliga a suponer la pérdida de registro de un ciclo climático. El relleno de la chimenea (Sima N) parece representar otros ciclos anteriores al Pleistoceno Superior.

Se tiene al polen de *Pistacia* como indicador de transición a interglacial en áreas mediterráneas. En Gran Dolina lo hay en el tramo superior de TD.6, a techo de TD.8, y bajo la costra terminal de Galería. Los interglaciales señalados serían, respectivamente, el Cromer, el Holstein y un inter-Saale. Sobre la curva paleotérmica se imposta otra, no coincidente, de variaciones de la humedad en pluviosidad y en su distribución. Hubo óptimos de humedad al final de TD.4, de TD.6 y de TD.8. La continentalidad y sequía son máximas al comienzo de TD.5, al final de TD.7 y entre TD.9-TD.10. Parece frecuente el esquema con evolución favorable de la humedad a lo largo de un retroceso de glaciar y al comienzo de fase cálida, y la evolución de ésta a mayor continentalidad y aridez.

Los depósitos del sistema kárstico de Atapuerca contienen, pues, una información singular sobre evolución del clima, la vegetación y los recursos animales en el Pleistoceno Medio por la diversidad de tipos de vestigios y procesos, por la amplitud del período comprendido, la fina calibración cronológica y los relativamente escasos vacíos de registro. Tenemos un marco bastante completo y detallado, amén del orden secuencial de escenarios en que se desarrolló la evolución de la humanidad a lo largo del Pleistoceno Medio.

La Sima de los Huesos, en Ibeas, es una chimenea vertical de más de 13 m de profundidad, prolongada en un túnel de otros 15 m en pendiente, en un recodo del aparato kárstico formado por Cueva Mayor y Cueva del Silo, a casi medio kilómetro por el interior desde la entrada de la primera. Los primeros en reconocer fósiles humanos fueron C. Puch y T. Torres. Cabía esperar mejores hallazgos. Fue preciso vaciar y cribar sistemáticamente varias toneladas de materiales revueltos por excursionistas. Se recuperaron así varios centenares de fósiles humanos. En 1985 se había tocado el sedimento intacto que los contiene, pero se decidió no excavar aquí hasta evacuar todo lo revuelto.

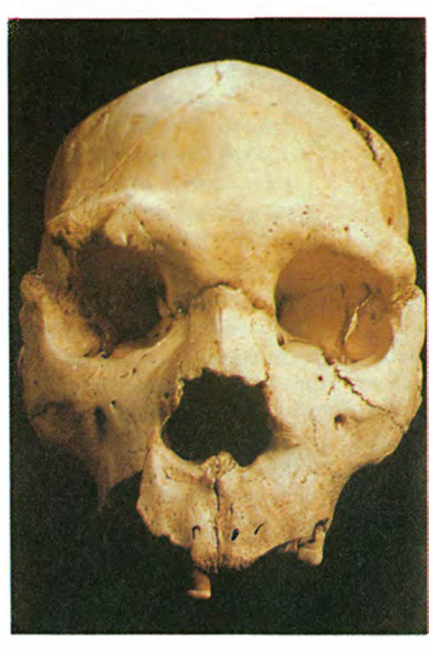
Hoy el mínimo de individuos distintos que se identifican por sus dentaduras es 30. En la Sima de los Huesos está casi la totalidad de huesos no craneales de las poblaciones de Europa anteriores al Neandertal.









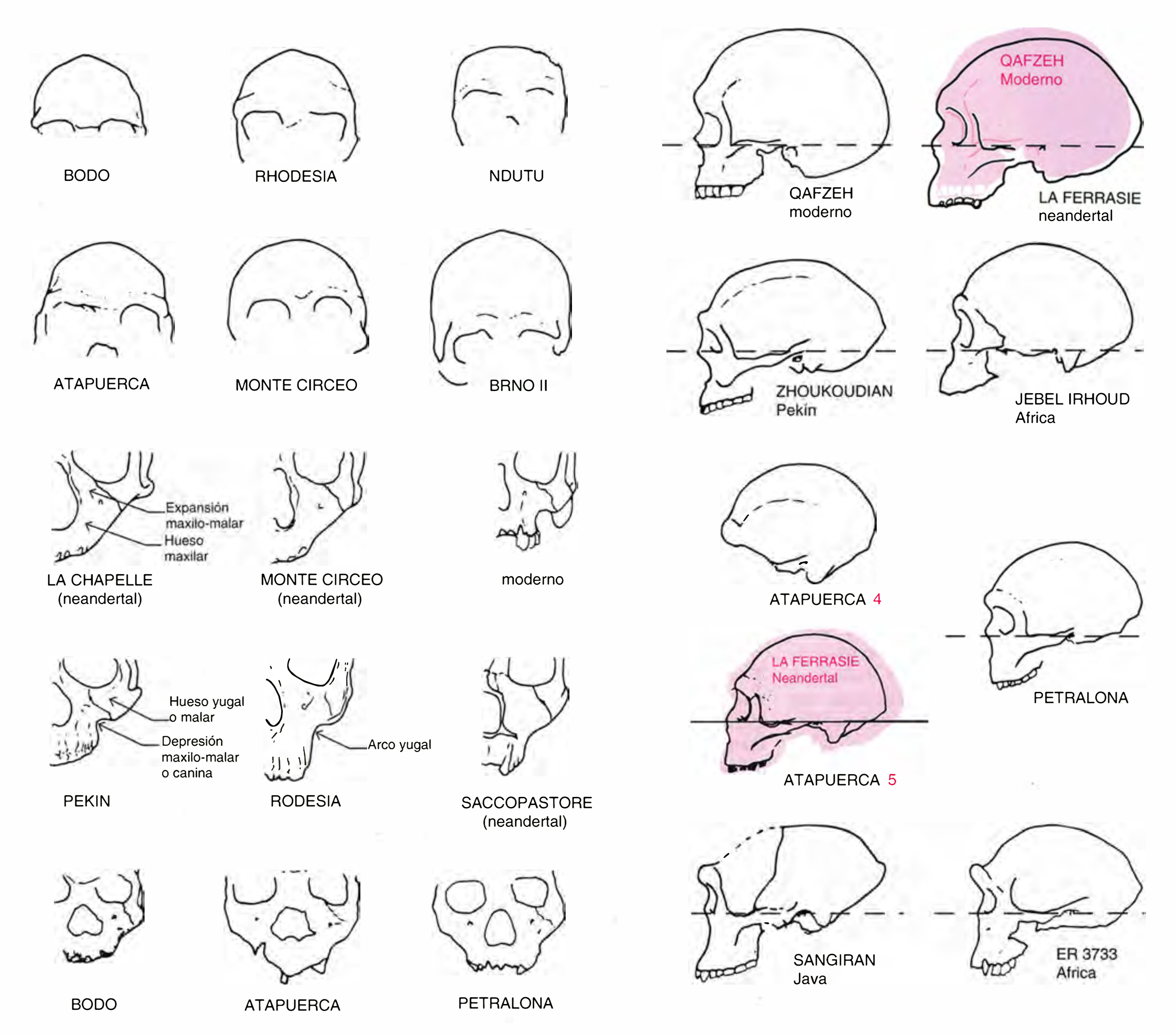


5. CRANEOS 4 Y 5 de la Sima de los Huesos desde varios ángulos: vistas lateral y superior del primero (*arriba*); vistas lateral, occipital y frontal del segundo (*abajo*), según fotos de Javier Trueba. Se complementan con otros fragmentarios, restos de 20 mandíbulas y partes de hasta 30 esqueletos.

Aparecen representadas todas las partes del esqueleto humano, muchas de las cuales no se conocen de ningún otro yacimiento del Pleistoceno Medio. Hay una caja craneana completa e indeformada, varias reconstruidas en parte y otros dos cráneos bastante completos y restos de más de veinte mandíbulas, seis bastante completas.

Yuji Yokoyama calculó la antigüedad de una mandíbula de Sima de los Huesos en 300.000 años por isótopos de uranio mediante recuento de rayos gamma. Los fósiles humanos de la Sima de los Huesos, por su asociación con el león fósil y con un oso (*Ursus deningeri*), tendrían menos de 525.000 años y más de 340.000. El oso de Deninger es reemplazado por *Ursus spelaeus spelaeus* antes de La Fage 3, de Orgnac 3 (entre 340 y 300 Ka) y de Bilzingsleben (c. 325 Ka): en estos sitios y en otros varios correlacionados se registra el verdadero *U. spelaeus*. Una costra estalagmítica sobre los fósiles de la Sima se ha datado en más de 300/350 Ka en dos laboratorios distintos. Todos los datos son, pues, coherentes dentro de ese margen.

Del hecho de hallarse los treinta o más esqueletos humanos de Ibeas completos, juntos y revueltos en una masa arcillosa rojiza sin planos de estratificación definidos, en la parte más profunda de la Sima, se infiere que llegaron a la situación presente arrastrados —quizás un corto trecho— o caídos en una masa deslizante de lodo, no mucho después de la muerte de aquellos individuos. Todo indica una época cálida con lluvias intensas, pero con notables estiajes. Estas condiciones se dieron en el episodio oceánico 13 (515 a 470 Ka) y 11 (420 a 365 Ka), ambos con la asociación arriba indicada de león y oso de Deninger. Varios indicios hacen más probable el último de estos tramos como el margen de edad en que vivió la población representada por estos fósiles. No es raro que a una serie de sacudidas sísmicas sucedan lluvias copiosas, y que éstas provoquen derrumbes de cuerpos de roca afectados por aquéllas, causando la muerte de familias enteras. Una colada de barro habría conducido a la situación final. Los



6. COMPARACION DE SECCIONES FRONTALES y perfiles de cráneos humanos de Atapuerca con otros cráneos fósiles de diversas regiones y edades. Las siluetas no están a escala. Se observa un mayor parecido de los cráneos de Atapuerca con el europeo de Petralona y los africanos de Bodo y Rodesia, y en parte con el protoneandertal de Saccopastore. La caja craneana n.º 4 de Atapuerca es singularmente abultada y elevada. La afinidad del grupo es mayor, no total, con los neandertales.

fósiles humanos hallados en Gran Dolina en la última campaña de excavaciones son más antiguos aún, asociados al conjunto faunístico primero, de finales del Pleistoceno Inferior, y útiles muy primitivos. Abren por ello horizontes totalmente nuevos a estos estudios.

Los fósiles humanos de la Sima de los Huesos tienen unidad de yacimiento, de lugar de vida y tiempo de muerte y, sin género de dudas, de vínculos familiares. Las distribuciones estadísticas de rasgos morfológicos y biométricos tienen valor representativo también en la hipótesis de muertes sucesivas. La distribución de sexos y edades inferidos, sobre todo, del estado de las dentaduras y de otros rasgos en los huesos, también permite un análisis paleodemográfico que ha emprendido Bermúdez de Castro. La muestra fósil revela el polimorfismo de una población real. Destruye las teorías y modelos construidos sobre la comparación de cráneos, o algunas mandíbulas sueltas. También obliga a tener en cuenta el peso del factor de crecimiento, y el sesgo de herencia paterna o materna en los individuos de una población y en la dinámica evolutiva de la descendencia.

Los problemas que se debaten en materia de evolución humana son el modelo evolutivo y la clasificación de los fósiles más antiguos del género *Homo* —entre más de dos millones de años y poco menos de millón y medio—, y lo mismo para el origen de los humanos actuales y la clasificación de los fósiles entre unos 500.000 y poco más de 30.000 años. De los primeros se discute la definición de *Homo erectus*, su relación con *Homo habilis* y si hubo más especies en dicho intervalo. De los últimos, si la humanidad moderna desciende de una sola población africana o si progresó en las diversas poblaciones y regiones hacia las formas modernas con tendencias comunes a varias subespecies. Hay escasez de fósiles humanos entre hace




7. NUCLEO DE SILEX DE TD.6, discoide, de talla multidireccional (*izquierda*), al lado de uno de Sidi-Abderrahman de la misma técnica. Hendedor de cuarcita de la unidad superior de la trinchera de Atapuerca (*derecha*).

poco menos de millón y medio de años y hace cerca del medio millón. La excepción era hasta ahora el registro de la isla de Java.

Los fósiles de Cueva Mayor ilustran el efecto de la presión evolutiva que diferentes poblaciones humanas regionales pudieron experimentar en una época crítica de diversificación acentuada: la que duró desde hace 500.000 años hasta la crisis entre los 100.000 y 40.000 años, que es cuando se configura la politípica humanidad actual. Los trabajos de P. J. Pérez y colaboradores revelan ausencia de lesiones por arma, presencia de lesiones traumáticas, infecciones periodontales, estigmas de épocas distróficas como son hipoplasia de esmalte dentario y líneas de Harris en tibias y frecuencia anómala de trastorno en la articulación temporal-mandibular.

Tanto en los cráneos como en las mandíbulas de Sima de los Huesos se observan rasgos bastante variables y otros más constantes. De éstos, un buen número los hacen parecidos con los neandertales mientras que en otros se dintinguen de estos últimos, pareciéndose más a fósiles del Pleistoceno Medio de Europa y Africa, sobre todo. Los cráneos de la Sima de los Huesos son medianamente altos y poco largos, no tan bajos ni tan alargados como sus contemporáneos de Africa —Rodesia, Saldanha—, ni como los de neandertales; tampoco son cortos ni tan altos como los modernos. El frontal es algo más elevado que en los primeros, en lo que se dintingue también de Omo-Kibish 2 (poco más de 100 Ka). El occipital es, en perfil, medianamente redondeado, más que en Arago y Petralona; no anguloso como en Kibish 2, Saldanha, en los pitecántropos y en los cráneos de Solo; ni prominente hacia atrás como en los neandertales y los de Pekín; tampoco es tan corto como los modernos.

La sección transversal de la bóveda es pentagonal con vestigio de quilla sagital. Los parietales, lateralmente elevados, alcanzan la anchura máxima en posición media a alta. Presenta bolsas parietales más o menos ligeramente pronunciadas. La sección es pentagonal y deprimida, con anchura máxima en parte inferior. La anchura máxima es también baja con bóveda redondeada arriba, sin bolsas. Más altas son las bóvedas de Laetoli H18 y Omo-Kibish 1. Los neandertales se distinguen por un perfil transversal singularmente circular. El "toro" (reborde saliente) sobre las cejas y la nariz de Ibeas se parece a los de Petralona y Florisbad más que a algunos neandertales. Los estudios en curso ilustrarán y matizarán esto con numerosas mediciones y detalles anatómicos.

El rostro (es decir, el "cráneo facial") es corto en los modernos, muy corto y ancho en Zhoukoudian ("Hombre de Pekín"); es largo —al menos en varones— de Ibeas, así como en otros del Pleistoceno Medio de Europa y de Africa. Muy distintiva entre neandertales y modernos es la región de la mejilla. En los neandertales, la parte del hueso maxilar que se extiende por delante del pómulo y hasta el puente de los nasales es plana o aun abombada; lateralmente, el saliente del pómulo se inicia desde abajo del maxilar y se expande tendido, continuo hacia arriba y afuera. En los modernos, y ya en los mesopleistocenos de China, el maxilar se retrae y hace entrante por debajo y delante del pómulo, que arranca de más arriba.

En Ibeas, como en los mesopleistocenos europeos y africanos, y aun en el neandertal primitivo de Saccopastore, el pómulo arranca de arriba, sobre un ligero entrante del maxilar, pero la tabla anterior de éste se tiende casi plana al puente nasal como en los neandertales, salvo en un caso, según Arsuaga y sus colaboradores.

Los arcos dentarios de la Sima de los Huesos están correspondientemente adelantados, como se ve también en las mandíbulas. Este rasgo se manifiesta en varios detalles de las numerosas mandíbulas de la Sima de los Huesos, que las asemejan a las de neandertales; en la notable robustez del hueso, apertura del arco dentario y otros rasgos se parecen más a las conocidas del Pleistoceno Medio de Europa y de Africa Oriental. Dominan también las semejanzas con los neandertales en los huesos del aparato locomotor, aunque el parecido no es total, y faltan fósiles con que compararlos en todo el Pleistoceno Medio.

Conforme a todo lo anterior, y como propuse en trabajos precedentes, los fósiles humanos de la Sima de los Huesos se clasifican bien con los europeos de la segunda mitad del Pleistoceno Medio (500-130 Ka) en la especie humana actual, como subespecie *Homo sapiens heidelbergensis*. Esta subespecie es distinta de sus contemporáneas *H. sapiens pekinensis* de China y *H. sapiens rhodesiensis* de Africa, aunque más próxima a la última, y principal antecesora de la subespecie de neandertal, *Homo sapiens neanderthalensis*. El parentesco de Ibeas y poblaciones vecinas con la

subespecie humana moderna *H. sapiens sapiens* aparece menos nítido.

Los cráneos de Ibeas se alinean también con los de neandertal por una tendencia más exagerada al aumento en capacidad —"exceso de neuronas", que pudo llegar a ser desventaja frente a un cerebro mejor organizado, finalmente, de los modernos.

El aumento en volumen del encéfalo es rasgo de herencia común que se manifiesta en todos los tipos humanos en la segunda mitad del Pleistoceno Medio con coeficiente variable. Los dos endocráneos de Atapuerca que se han medido tienen 1125 y 1390 cc, un rango algo superior a los de Zhoukoudian, penecontemporáneos, y a los de Solo, probablemente más modernos.

La muestra de Atapuerca induce a pensar en una aparición diacrónica de rasgos variantes durante el curso de la evolución humana, de frecuencias distintas de éstos en poblaciones regionales de una misma especie y de aceleraciones dispares en la acentuación de rasgos heredados y en la pérdida de otros. Atapuerca nos enseña cuánto queda por aprender sobre la aparición, desaparición, estabilidad y distribución de los rasgos físicos, y su relación con el origen y selección de especies, antes de precipitarnos a categorizar nuevas especies linneanas.

La comparación de los fósiles de TD.6 permitirá aclarar si la población de la Sima de los Huesos (y, por ende, los preneandertales europeos) descendía de otra que la precedió en la región, de una población inmigrante que reemplazó a la precedente o del mestizaje de una y otra.

Los fósiles de los horizontes de TG.11 y su distribución se han comparado con los restos de comida de cazadores humanos, de predadores y carroñeros. Se observan marcas de incisivos de puercoespines y de colmillos de carnívoros, junto con huellas de descarnación con ayuda de utensilios de sílex. J. C. Díez Fernández-Lomana ha demostrado que los humanos descendían ocasionalmente a esta cavidad, como también lo hacían lobos y el perro jaro. O bien unos y otros se disputaban la carne o carroña, o bien la aprovechaban unos tras otros. No era necesario traer hasta allí presas de caza, pues la torca de Tres Simas constituía una trampa natural, por donde caían las reses descuidadas. La dieta de caza aquí ni se confirma ni se excluye. Podía no ser procurada habitual sino ocasionalmente, como también la carroña y las reses moribundas atrapadas en las torcas. A mano había, según los tiempos, piñas, bellotas, moras, uvas, nueces, algarrobas, pistachos y gramíneas. Los percutores o cantos enteros frecuentes en los suelos de TG.11 pueden haberse llevado para romper miembros de un animal entrampado o para ahuyentar a competidores, o bien para tallar otros bloques y elaborar utensilios.

De un nivel en TD.5 procede un núcleo en cuarcita con talla periférica y suavemente centrípeta. Otro núcleo de cuarcita, de gran tamaño y con pocas extracciones, una raedera y otros restos de talla se hallaron en TD.4, de hace 800.000 años. Es dudoso que los humanos penetraran a este lugar, profundo en la cueva en ese tiempo, y es posible que esos vestigios de actividad humana provengan de caída y arrastre.

Todavía en TD.6 la industria recogida en el nivel con fósiles humanos revela transformación escasa a juicio de E. Carbonell y M. Mosquera. Asomando en el corte, más abajo, se recogieron en TD.6 dos grandes núcleos de sílex, bipiramidados, de sección cuadrangular y talla multidireccional, como los del Achelense IV en Sidi Abderrahman, Casablanca. Todavía no conozco industria de TD.7. El achelense propiamente dicho parece presentarse de improviso, probablemente importado, en niveles equivalentes de Galería Tres Simas.

En TG.11 se han recogido utensilios de sílex, de cuarcita y otras rocas metamórficas: bifaces sobre lasca, denticulados, raederas grandes, raspadores con retoque abrupto y puntas de Tayac. En conjunto, representan un estadio terminal de las tradiciones del Paleolítico Inferior, con rara presencia de simetría. Se encuentra en TG.11 y en TD.10 una eficacia estudiada en la dirección muy precisa de los golpes para obtener con pocos de éstos los perfiles y diedros deseados en los filos útiles, con economía tanto de golpes de talla como de retoque.

En Gran Dolina hay indicios de haber sido usada esta cavidad, muy abierta al exterior, como taller, en la base de TD.11 y en lo alto de TD.10, por lo menos. Lascas desechadas al tallar no se dispersaron ni fueron removidas, y J. C. Díez pudo recomponer algunas entre sí y con el núcleo restante. En época más temprana, al final de la unidad segunda del Complejo Tres Simas y en el margen de la Sima Norte, también hay muestras de talla sencilla, o retoque, en el lugar. Los arqueólogos del equipo de Carbonell estudian experimental y analíticamente las pautas y sistemas de explotación de los diversos materiales líticos, así como las fuentes originales de éstos.

La ocupación del espacio y su intensidad ha variado con la evolución de los recursos primarios y del clima. En general se aprecia una familiaridad creciente con los recintos kársticos a lo largo del Pleistoceno y de la evolución cultural. En el Pleistoceno Medio y con cultura achelense, los humanos penetraban apenas en cavidades interiores de las cuevas, al menos en Atapuerca.

El intervalo entre hace poco más de 500.000 años y algo más de 400.000 años fue crítico en la evolución ambiental y cambios faunísticos, al menos en Europa. También parece haberlo sido para la evolución física, distribución y desarrollo técnico y mental de la humanidad. El cómo y el porqué serán cuestiones prioritarias en varios campos científicos en los próximos años, y Atapuerca guarda una buena cantidad de piezas para resolver este rompecabezas. Sedimentos atribuibles a esta época tienen mayor desarrollo y son más fértiles en la Covacha de los Zarpazos. Queda por excavar la serie de depósitos de la Sima del Elefante y su prolongación en una galería de Cueva Mayor, entre otros afloramientos. En Atapuerca y en la Cueva Mayor de Ibeas de Juarros no se ha hecho sino comenzar, y es motivo de alegría el que se descubran yacimientos comparables con éstos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EL HOMBRE FÓSIL DE IBEAS Y EL PLEISTOCENO DE LA SIERRA DE ATAPUERCA, I. Dirigido por Emiliano Aguirre, Eudald Carbonell y José M. Bermúdez de Castro. Junta de Castilla y León, 1987.

THE ATAPUERCA SITES AND THE IBEAS HOMINIDS. E. Aguirre et alii en *Human Evolution*, vol. 5, págs. 55-73; 1990.

MANDIBULES ET DENTS D'IBEAS (ESPAGNE) DANS LE CONTEXTE DE L'EVOLUTION HUMAINE EN EUROPE. A. Rosas, J. M. Bermúdez de Castro y E. Aguirre en *L'Anthropologie*, vol. 95, págs. 89-102; 1991.

CRANIAL REMAINS AND LONG BONES FROM ATAPUERCA/IBEAS (SPAIN). Juan L. Arsuaga, José M. Carretero, Ignacio Martínez y Ana Gracia en *Journal of Human Evolution*, vol. 20, págs. 191-230; 1991.

LA TALLA LÍTICA EN ATAPUERCA (BURGOS). Marina Mosquera y Eudald Carbonell en *Trabajos de Prehistoria*, vol. 49, páginas 131-154; 1992.

THREE NEW HUMAN SKULLS FROM THE SIMA DE LOS HUESOS MIDDLE PLEISTOCENE SITE IN SIERRA DE ATAPUERCA, SPAIN. Juan-Luis Arsuaga et alii en *Nature*, vol. 362, págs. 534-537; 1993.

Las virtudes del ruido de fondo

En física, biología e ingeniería se habla hoy mucho del fenómeno de la resonancia estocástica, por el cual el ruido de fondo viene a reforzar las señales débiles

Frank Moss y Kurt Wiesenfeld

El ruido provoca confusión. Nos irrita cuando telefoneamos desde una calle concurrida o escuchamos una emisión de radio perturbada por estáticos. Durante largo tiempo se ha luchado por reducir al mínimo esa molestia. Pero a lo largo de los diez últimos años se ha ido comprobando que el ruido de fondo a veces tiene su lado útil. Y más aún, que numerosos sistemas físicos, desde circuitos electrónicos hasta neuronas, operan mejor dentro de un ruido aleatorio.

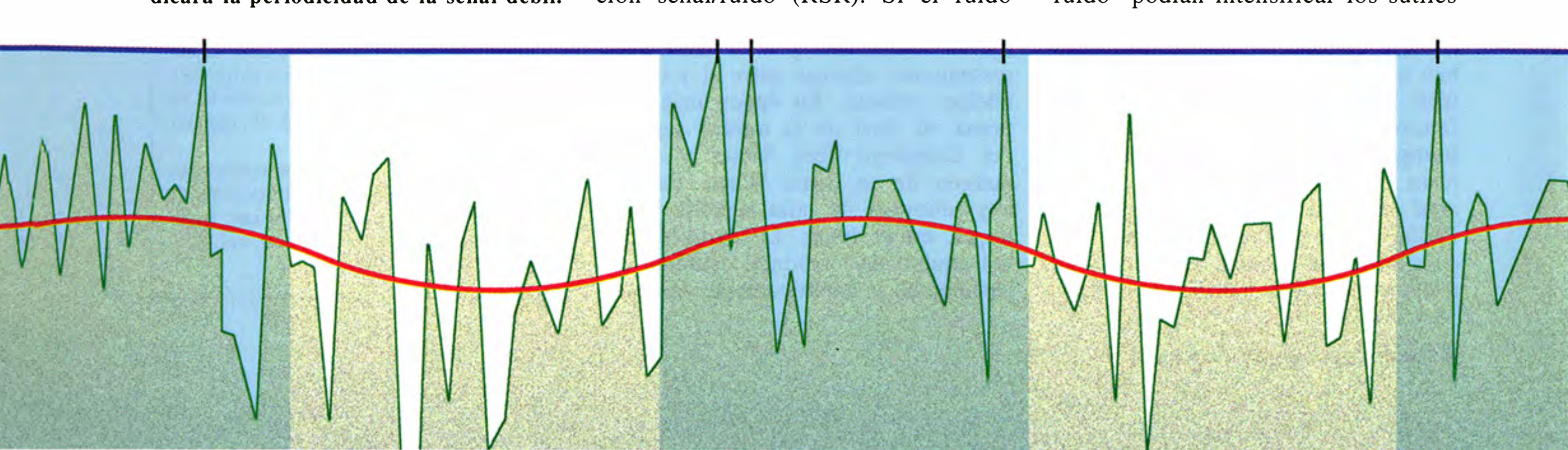
Para comprender esta resonancia estocástica, denominación que recibe el fenómeno, se recurre a una analogía. Imaginemos una bola que descansa en una de dos cavidades contiguas, como las de una bandeja para huevos. Sometido a un suave vaivén rítmico (que podría corresponder a una señal periódica débil), el conjunto se desplaza atrás y adelante, y la bola se limita a moverse en el fondo de una cavidad. Esta fuerza periódica débil quedará oculta si los movimientos de la canica se detectan sólo cuando salta de un pozo a otro. Si añadimos ruido a este sistema —por ejemplo, sacudiendo verticalmente la bandeja—, nos parecerá que se enmascara todavía más el movimiento de vaivén.

La verdad es que se produce el efecto opuesto. A veces, la adición de ruido a la fuerza débil confiere a la canica energía suficiente para rebasar la frontera que limita los dos pocillos. Así, a lo largo del tiempo, se ve a la bola saltar hacia atrás y hacia adelante de un modo aleatorio. Sin embargo, según la teoría de la resonancia estocástica, estos saltos no son enteramente impredecibles; la probabilidad de que la bola salte de una cavidad a otra será mucho mayor cuando la fuerza débil pase por un máximo. De la distribución de los saltos podrá entonces desprenderse la periodicidad de la señal débil.

La característica esencial de este sistema —y de cualquiera en el que se produzca resonancia estocástica— es que no hay relación lineal entre la entrada (en este caso, la fuerza débil) y la salida (los saltos de la canica de un pocillo a otro). Es decir, si la entrada no alcanza un determinado umbral, no aparece salida de ningún tipo. (Al revés que en los sistemas lineales, donde siempre hay una salida proporcional a la entrada.) El ruido aleatorio puede favorecer las señales débiles en los sistemas no lineales induciéndolas a superar el umbral [*véase* "Taller y laboratorio", en este mismo número].

El grado en que la señal resulta beneficiada dependerá de la adición justa de ruido aleatorio, y vendrá medido por el aumento de la relación señal/ruido (RSR). Si el ruido incorporado es demasiado débil, la señal no se reforzará sensiblemente. Y si es excesivo, ahogará la señal reforzada. Hay, pues, una cantidad de ruido óptima que transmite una máxima información. El descubrimiento de que a veces el ruido es un regalo, y no un estorbo, ha provocado una reciente oleada de interés por la resonancia estocástica, no sólo en física, ingeniería y biología, sino también en casi todas las disciplinas en que se manejen ruidos y umbrales.

Los primeros en concebir la idea de resonancia estocástica fueron los italianos Roberto Benzi, Alfonso Sutera y Angelo Vulpiani, en 1981. Pretendían explicar así una persistente paradoja de la climatología. En efecto, aunque las glaciaciones terrestres hayan ocurrido con cierta regularidad —más o menos cada 100.000 años—, parece que sólo sucesos imprevisibles han podido desencadenarlas. Los geólogos sospecharon que una desviación que se produce cada 100.000 años en la órbita solar de la Tierra podía guardar relación con la periodicidad de las eras glaciales, pero por sí sola esta desviación no podía causar un gran enfriamiento. Mayor influencia ejercen, con mucho, las oscilaciones anuales de la cantidad de calor recibida del Sol y almacenada en la Tierra, sujetas a factores muy diversos. El grupo italiano sugirió que estas grandes fluctuaciones asimilables al "ruido" podían intensificar los sutiles



1. LOS SISTEMAS NO LINEALES sólo detectan las señales periódicas (*rojo*) por encima de cierto umbral. El ruido (*verde*) puede reforzar una señal débil hasta superar el umbral, con más facilidad cerca de las crestas de la señal (*zona azul*). La salida del detector (*marcas negras*) indicará la periodicidad de la señal débil.

efectos de la desviación orbital cada 100.000 años, y ello explicaría la regularidad de los períodos glaciales.

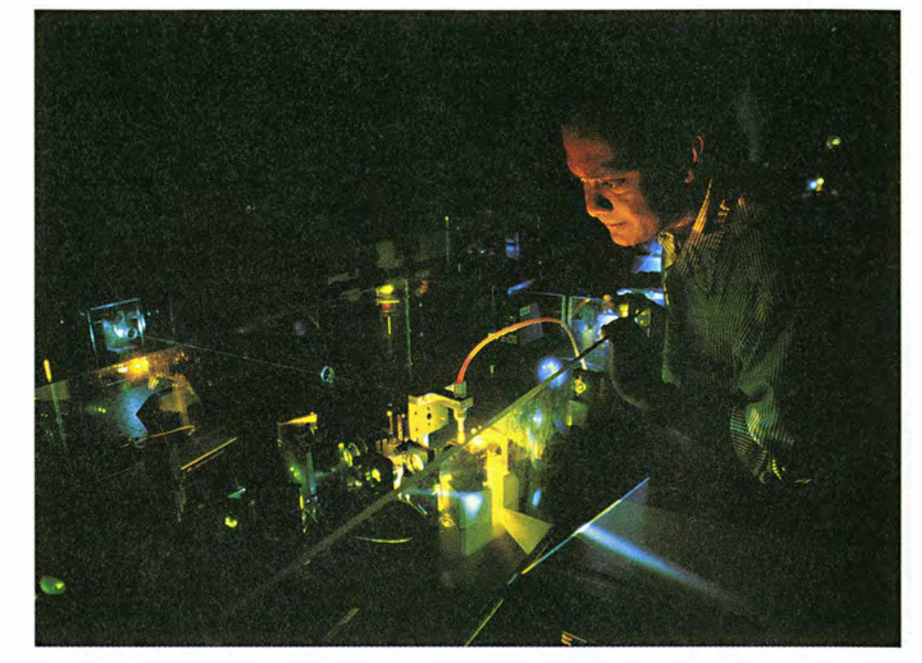
El caso es que el problema sigue sin resolverse. No obstante, el concepto de resonancia estocástica había comenzado a intrigar a los científicos, y sólo dos años más tarde el grupo francés de Stephan Fauve confirmó la teoría básica utilizando el llamado excitador de Schmitt, en el que un ruido eléctrico aleatorio amplifica débiles señales excitadoras periódicas que recorren el circuito. Pese a esta notable experiencia, el asunto continuó durmiendo cinco años más, y por fin en 1988 un grupo del Instituto de Tecnología de Georgia, constituido por Rajarshi Roy, Bruce McNamara y uno de los autores (Wiesenfeld), descubrió que se producía resonancia estocástica en un láser de anillo.

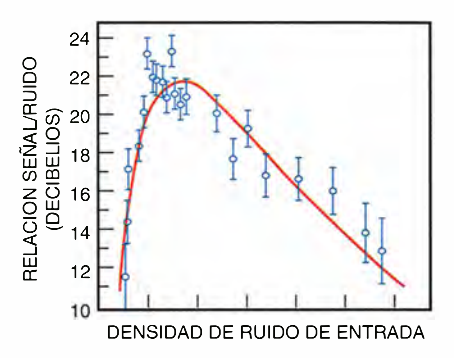
En este dispositivo, los espejos reflejan la luz del láser y la hacen recorrer un bucle cerrado, en sentido dextrógiro o levógiro. En términos matemáticos, la situación es afín a la del modelo de doble cavidad; la luz equivale a la canica y cada sentido de propagación corresponde a una cavidad. Cuando se activa el láser, puede iniciarse el giro en uno u otro sentido, pero una vez en funcionamiento cualquier perturbación puede provocar la inversión del sentido de propagación de la luz. En nuestro experimento provocamos tales alteraciones sirviéndonos de un modulador acústico-óptico que genera ondas acústicas estacionarias en un cristal. Dependiendo de la frecuencia de estas ondas, controlable por medios electrónicos, la luz prefiere propagarse en un sentido u otro.

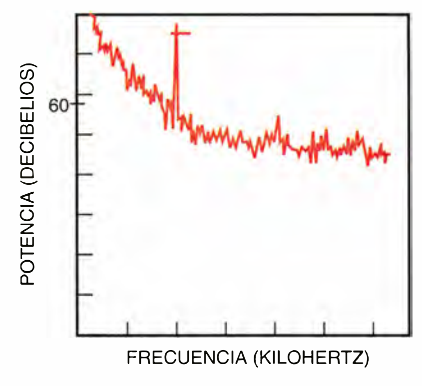
Para crear una señal, modulamos periódicamente la frecuencia de las ondas estacionarias. Si ello se hiciera con intensidad suficiente, se invertiría la propagación de la luz con una cadencia regular, pero nos aseguramos de no llegar a ese punto. A continuación, superpusimos "ruido" a esta señal modulando aleatoriamente la frecuencia de las ondas estacionarias. El resultado fue que la luz cambiaba de sentido más o menos inesperadamente, aunque en cierta consonancia con la señal periódica. Un detector exterior al láser registraba cuándo la propagación era levógira, logrando así representar en el tiempo el fenómeno de la conmutación, tanto en sus componentes regulares como aleatorios.

El cálculo del espectro de potencia de esta secuencia temporal nos ofreció una buena medida de la información contenida en dicha conmutación con respecto a su propio ruido. En su representación gráfica, el componente regular aparecía mediante una aguda cresta a la frecuencia de la señal, mientras que el ruido aleatorio se extendía en una banda ancha a través de todas las frecuencias. La RSR es simplemente la altura de ese pico agudo comparada con la de la ancha base. Vimos que dicha relación era máxima cuando el ruido añadido alcanzaba determinada intensidad, lo cual demostraba una resonancia estocástica. Dentro de cierto margen, pues, la adición de ruido errático realmente aumentaba y no disminuía la regularidad de la conmutación.

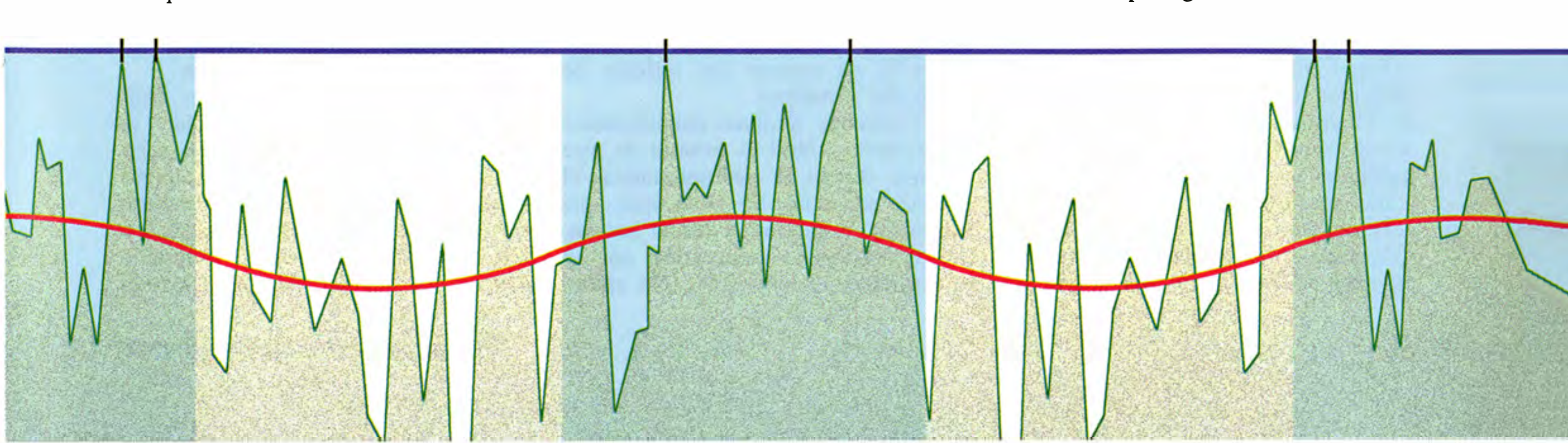
Este hallazgo disparó la investigación, y en pocos años se demostró que se daba resonancia estocástica en una amplia gama de sistemas fí-



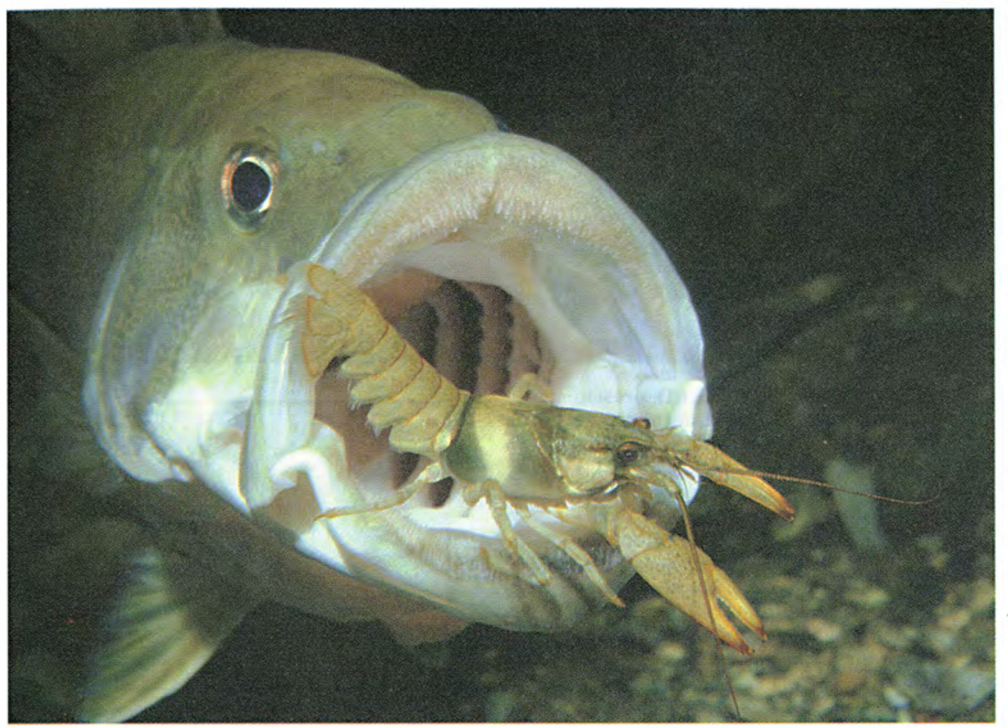


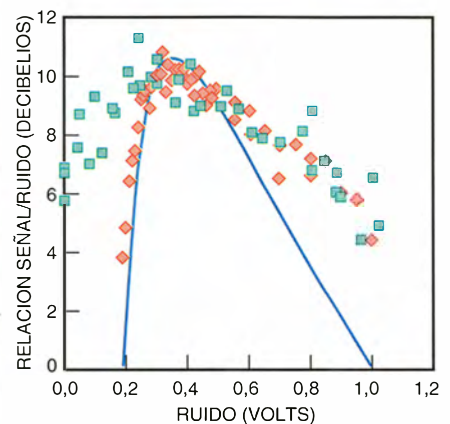


2. LOS LASERES DE ANILLO presentan resonancia estocástica. Interponiendo ondas acústicas en el trayecto de un láser se consigue invertir la rotación de la luz a un ritmo regular o aleatoriamente (*fotografía*). Considerada una influencia periódica débil, hay una cantidad óptima de ruido añadido que da la conmutación más regular (*gráfico superior*). En el espectro de potencia de la salida (*gráfico inferior*) la señal débil se alza como afilada espiga sobre una ancha base de ruido.



3. EL CANGREJO que huye de un pez predador (*fotografía*) detecta la leve agitación que éste produce en el agua mediante las células ciliadas de su cola (*derecha, arriba*). El ruido errático potencia la sensibilidad de estas células, que actúan como detectores de umbral. La relación señal/ruido (*derecha, abajo*) es máxima para una determinada proporción de ruido añadido, según indicaba la teoría (*verde*) y demostraba un modelo eléctrico (*rojo*).





sicos, como otros tipos de circuitos eléctricos y de láseres, los SQUID (dispositivos superconductores de interferencia cuántica) y muchos más. Ultimamente los estudios sobre resonancia estocástica empiezan a cruzar la barrera que separa la biología sensorial de la percepción.

En la Universidad de Missouri en St. Louis, un grupo dirigido por uno de los autores (Moss) decidió investigar si la resonancia estocástica u otro fenómeno conexo podría desempeñar alguna función importante en los sistemas sensoriales de los animales. Al fin y al cabo, la misión primordial de los sentidos es la de detectar señales débiles que transportan información a través de ambientes ruidosos. Para empezar, elegimos un sistema muy sencillo: las células mecanorreceptoras de la cola móvil de *Procambarus clarkii*, un cangrejo de agua dulce.

Estas células, terminadas en cilios finísimos de 25 a 100 micrometros de longitud, están especializadas en detectar movimientos sutiles (y probablemente periódicos) del agua, como los que genera la ondulante cola de un pez depredador próximo. Con toda probabilidad, esas células ciliadas actúan como una suerte de sistema de alarma, y lo hacen con gran eficacia; el cangrejo pertenece a una especie muy antigua y de tenaz supervivencia, pero además estos rudimentarios sensores son comunes a crustáceos muy diversos, incluidas gambas y langostas.

La célula ciliada trabaja de un modo muy simple. Al ser agitada, genera un impulso nervioso, mensurable en una afilada espiga de unos 100 milivolts durante 200 microsegundos. Este impulso recorre una neurona y llega a un ganglio terminal, agrupación de células nerviosas cercana al extremo del abanico caudal. Dicho ganglio, último de una cadena que se extiende hacia el cerebro del animal, comprende alrededor de 200 neuronas e interneuronas de conexión que colaboran en el procesamiento de la información. El ganglio terminal procesa toda la información que le envían las células ciliadas y toma decisiones básicas, como la de activar los reflejos de huida del crustáceo.

Por muchos motivos consideramos provechoso y fácil el estudio de este sistema. Según la neuroanatomía, el aparato sensorial no hace más que transmitir al ganglio terminal los impulsos nerviosos generados por el movimiento de los cilios. (No aparecerán, por tanto, otras señales nerviosas de mayor complejidad.) Simplificando más aún, todos los datos disponibles indican que las neuronas sensoriales funcionan de modo muy similar a los detectores de umbral no lineales. Cuando los movimientos ciliares son muy débiles y no alcanzan cierto nivel, no se generan impulsos nerviosos.

En nuestras pruebas, cortamos un trozo de cola de cangrejo que contenía numerosas células ciliares, el cordón nervioso y el ganglio terminal, y montamos todo ello sobre un soporte que podía moverse en un recipiente lleno de una solución salina. A continuación insertamos un electrodo en el cordón nervioso, contactando con una sola neurona sensorial. Con cuidado fuimos retorciendo los cilios, uno a uno, para averiguar cuál de ellos activaba la neurona escogida. El montaje en bloque se desplazaba a través de la solución movido por un transductor electromecánico.

Al mover el conjunto hacia atrás y adelante a un ritmo regular, se midieron en la neurona una serie aparentemente aleatoria de espigas señalizadoras, que luego convertimos en impulsos rectangulares normales. Sus espectros de energía, computados, se asemejaban mucho a los re-

gistrados en el láser de anillo: una espiga afilada que representaba la señal periódica sobre un ancho pedestal de ruido de fondo. A partir de tales espectros obtuvimos la RSR y hallamos cuán sorprendentemente sensibles eran los cilios del cangrejo. La mayoría de las células probadas detectaban movimientos periódicos del soporte de sólo 10 nanómetros de amplitud.

En la etapa siguiente del experimento redujimos la amplitud del movimiento hasta límites casi indetectables. El movimiento subsistente creaba una señal periódica débil, que esperábamos fuese similar a la que percibe el cangrejo cuando se acerca un predador. Añadimos luego, a dicha señal, un ruido totalmente aleatorio, superponiendo fluctuaciones irregulares al movimiento. Se intentaba imitar así el ruidoso entorno en que viven los cangrejos, entre rocas azotadas por rápidas corrientes. Lentamente se fue aumentando la amplitud de ese ruido, y en cada nivel se midieron y promediaron los espectros de potencia de los impulsos nerviosos.

En general, los resultados concordaron con las predicciones teóricas y con las simulaciones electrónicas de un detector de umbral, pero había algunas discrepancias. Para niveles de ruido elevados, la RSR no disminuía con la rapidez que señalaba la teoría. Ahora ya sabemos por qué, aunque entonces lo ignorábamos: después de cada episodio de excitación las neuronas pasan por un período refractario —"tiempo muerto"— durante el cual no pueden reactivarse. Por consiguiente, al elevarse los niveles de ruido las excitaciones serán más frecuentes, pero también lo serán los tiempos muertos, que anulan varias excitaciones consecutivas. El efecto neto es que la relación señal/ruido se mantiene más alta.

Apareció además otra diferencia. Los espectros obtenidos del cangrejo rebasaban tanto las predicciones teóricas como la simulación electrónica para intensidades de ruido pequeñas. Achacamos este exceso al inevitable ruido interno que crea la actividad bioquímica y eléctrica de la célula en las neuronas sensoriales. Es obvio que unos niveles altos de dicho ruido ahogan los efectos del ruido externo añadido e impiden la resonancia estocástica. Entre las neuronas extraídas de un gran número de cangrejos, una aplastante mayoría presentó resonancia estocástica y el resto demostró tener un fuerte ruido interno. Queda abierto un interrogante: ¿podría este ruido interno, en apariencia indeseable aunque no insólito, servir para alguna función sensorial útil?

Aunque las últimas fronteras de la resonancia estocástica se encuentren en la biología, los físicos no han agotado el tema. En particular, se preguntan si este tipo de resonancia se manifiesta a escala cuántica. Los recientes trabajos de Susan N. Coppersmith y Ritva Löfstedt dan respuesta afirmativa, si bien en distintas condiciones que el caso de un sistema macroscópico como el láser de anillo.

Un sistema cuántico puede también asimilarse al modelo de cavidades contiguas. En este caso, los pocillos representarían dos posiciones estables de una impureza en un conductor metálico muy pequeño (menos de un micrometro). Las vibraciones de fondo aleatorias de la red atómica pueden comunicar suficiente energía al defecto para que supere la barrera y se traslade de una posición a otra. Hasta ahí, la analogía con la doble cavidad de los sistemas macroscópicos es cabal. Pero, además, puede producirse un fenómeno puramente mecanocuántico: el defecto puede atravesar la barrera por efecto túnel sin necesidad de remontarla.

La observación del efecto túnel cuántico requiere siempre que el sistema esté muy frío, a temperaturas próximas al cero absoluto. De hecho, cuando la temperatura es suficientemente baja el efecto túnel cuántico puede por sí solo producir una conmutación aleatoria. A este sistema cuántico se le superpone una señal periódica aumentando o disminuyendo la cantidad de energía necesaria para saltar de una cavidad a otra, lo cual puede lograrse aplicando un campo electromagnético y alterando el potencial entre las cavidades. Sorprendentemente, la teoría sostiene que para haber resonancia estocástica en este caso el potencial básico debe ser asimétrico; es decir, una cavidad más profunda que la otra, o una de las dos posiciones posibles de la impureza ligeramente más estable. Sucede aquí lo contrario que en el fenómeno clásico, donde tal desequilibrio aminora el efecto.

Diferencias a un lado, lo notable es que un proceso estocástico de suma sencillez invada campos científicos muy diversos: técnicas de láser, biología sensorial y mecánica cuántica. En muchas de estas disciplinas se hallan rápidamente aplicaciones técnicas. Como ejemplo, se intenta optimizar la resonancia estocástica en los SQUID con el fin de que puedan detectar mejor los campos magnéticos de periodicidad débil en entornos ruidosos. Leon O. Chua y Vadim S. Anishchenko han comprobado tal fenómeno hasta en un circuito electrónico caótico (el circuito de Chua).

La resonancia estocástica ofrece todavía más posibilidades en el campo de la medicina, donde numerosas funciones fisiológicas responden a umbrales y abundan las variaciones erráticas. Muchos trastornos del sistema nervioso se caracterizan por una elevación de los umbrales sensoriales, que frenan el ritmo de excitación de las neuronas correspondientes. Por dar un ejemplo, las personas mayores suelen mostrar dificultades para andar y mantener el equilibrio por haber crecido los umbrales de excitación de sus propioceptores, las neuronas que perciben el ángulo, la velocidad y el desplazamiento de las extremidades en movimiento. La adición de ruido aleatorio a las señales neurales que no alcanzan esos umbrales aceleraría el ritmo de excitación de los propioceptores, y quizá de ese modo podría mejorarse la locomoción y el sentido de equilibrio de los pacientes.

FRANK MOSS y KURT WIESENFELD iniciaron su colaboración en 1988. Moss enseña física a alumnos de biología y medicina en la Universidad de Missouri e investiga procesos estocásticos no lineales en los cangrejos con modelos electrónicos. Wiesenfeld, profesor de física en el Instituto de Tecnología de Georgia, estudia la teoría de la dinámica no lineal y sus aplicaciones a problemas de óptica y física de la materia condensada.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BRINGING MORE ORDER OUT OF NOISINESS. John Maddox en *Nature*, vol. 369, página 271; 26 de mayo de 1994.

STAGGERING THROUGH THE ICE AGES: WHAT MADE THE PLANET CAREEN BETWEEN CLIMATE EXTREMES? Richard Monastersky en *Science News*, vol. 146, n.º 5, páginas 74-76; 30 de julio de 1994.

STOCHASTIC RESONANCE AND THE BENEFITS OF NOISE: FROM ICE AGES TO CRAYFISH AND SQUIDs. K. Wiesenfeld y F. Moss en *Nature*, vol. 373, págs. 33-36; 5 de enero de 1995.

Fisiología de la enfermedad por descompresión

La exposición a altas presiones puede dañar el organismo y producirle incluso la muerte. Poco a poco, los fisiólogos van desentrañando los mecanismos subyacentes

Richard E. Moon, Richard D. Vann y Peter Bennett

Aquella madrugada del verano de 1988, el helicóptero bajó en picado de un cielo negro de azabache. Lo aguardaba una camilla de nuestro servicio hiperbárico del hospital clínico de Duke en Durham. El paciente, un abogado de 42 años que estaba de vacaciones, presentaba un exantema en el abdomen y sopor. Por lo que conocíamos ya de su caso, sospechábamos que también tenía burbujas en el cerebro.

Siete horas antes, al final de la tarde, había vuelto a superficie después de su segunda inmersión diaria y se sentía bien. Cuarenta y cinco minutos más tarde desarrolló cefalea y empezó a encontrarse mareado, con problemas para andar y una suerte de hormigueo en el abdomen. Su visión, según sus propias palabras, comenzó a "obnubilarse". Sintió náuseas. De vuelta al hotel, se perdió, empezó a hablar de un modo ininteligible y, durante un rato, no reconoció a su novia.

Después de practicarle un examen neurológico, se le encerró herméticamente con una enfermera especialmente preparada en una de las cámaras hiperbáricas presurizables utilizadas para tratar esta afección. En el interior de la cabina se elevó la presión hasta una equivalente a 2,8 veces la atmosférica y luego, durante un período de seis horas, se fue reduciendo por etapas hasta llegar a una atmósfera, mientras el paciente respiraba oxígeno puro. Este tratamiento es el indicado en casi todas las formas de enfermedad por descompresión (expresión general que comprende diversos trastornos que afectan a los buzos y a quienes trabajan con aire comprimido, entre otros). La resonancia magnética de la cabeza del enfermo corroboraba nuestra sospecha sobre la presencia de burbujas: se observaban puntos de excesivo líquido en el cerebro, señal de la hinchazón del tejido iniciada por burbujas.

Alrededor de una semana después de lo que él denominó "desorientación visual" y algunos otros síntomas más propios del oído interno, que acabaron resolviéndose, el buzo se recuperó por completo; es la salida habitual de la mayoría de los pacientes que sufren graves problemas de este tipo y son sometidos a recompresión en una cámara.

Por último, lo que convertía en interesante ese caso para nosotros era su encaje en una hipótesis que estábamos desarrollando sobre el papel del corazón en la enfermedad por descompresión. Las teorías clásicas no suelen prestar atención a este órgano. Pero un examen posterior al tratamiento reveló que este buzo padecía una afección cardiaca conocida como foramen oval permeable: una especie de conducto a través del cual las burbujas podrían penetrar en la sangre arterial. Una vez en las arterias, las burbujas podrían obstruir el paso de la sangre a órganos vitales, en particular al sistema nervioso central (el cerebro y la médula espinal).

RICHARD E. MOON, RICHARD D. VANN y PETER BENNETT enseñan en la Universidad de Duke. Profesor asociado y profesional ejerciente en anestesiología y medicina pulmonar, Moon ha estudiado el intercambio gaseoso y el equilibrio de líquidos en el buceo de profundidad. Dirige también el centro hiperbárico de Duke y una red de alerta para buceadores. Vann se dedica a la fisiología de la descompresión y al perfeccionamiento de las técnicas de descompresión de buzos y astronautas. Bennett ha sido uno de los adelantados en la investigación de la narcosis producida por gases inertes, así como del síndrome nervioso de alta presión.

Un legado médico único

El tratamiento del veraneante y, en especial, el descubrimiento de su dolencia cardiaca transcurrieron de acuerdo con pautas conocidas de la historia de la enfermedad. En los dos siglos que el ser humano ha podido respirar aire comprimido, los investigadores han reunido (a menudo como consecuencia de lesiones desafortunadas) un notable registro de las respuestas del organismo humano ante las tensiones para las que no fue diseñado. Desde la potencia narcótica del nitrógeno presurizado y la toxicidad del oxígeno hasta los efectos de la pérdida de calor y los extraños síntomas de la presión sobre el sistema nervioso central, el buceo ha proporcionado un rico y singular acervo de datos clínicos.

De todas esas aflicciones, la más común, y pese a ello imperfectamente conocida, es la enfermedad por descompresión. La causa subyacente (presencia de burbujas en la sangre o los tejidos) se estableció ya en 1877, y la enfermedad se ha estudiado con detenimiento desde entonces. El fisiólogo francés Paul Bert llamó la atención sobre la intervención de las burbujas de gas en la patología. Comprobó que estaban formadas por nitrógeno; dado que las células hísticas metabolizan el oxígeno, éste no suele ser un problema durante la descompresión.

Lo que hizo posible la manifestación de la enfermedad fue la invención de la bomba de aire y después, en 1841, el cajón neumático, cámara de aire comprimido utilizada en la construcción de túneles y en la cimentación de los puentes. Los obreros entraban en un cajón neumático a través de una esclusa de aire y trabajaban en una atmósfera de aire comprimido que impedía la filtración

del agua circundante. Pero cuando se les volvía a someter a descompresión a una atmósfera, solían sufrir dolores articulares y a veces problemas más serios: entumecimiento, parálisis, pérdida de control vesical o intestinal, e incluso la muerte.

Fue durante la construcción del puente de Saint Louis, a principios de los años setenta del siglo pasado, cuando el miedo a la enfermedad por descompresión caló en la población. En total, trabajaron unos 600 hombres en los cajones neumáticos del puente de Saint Louis. La enfermedad neurológica por descompresión, la forma más seria de la enfermedad, afectó a 119 obreros, 14 de los cuales murieron.

Entre los heridos se hallaba Alphonse Jaminet, médico de los trabajadores. Cierta tarde, después de salir del cajón se sintió mareado e incapaz de hablar, con dolores en las extremidades y parálisis de un brazo y de las dos piernas. Puso las piernas en alto y bebió ron; en una semana, sus síntomas habían desaparecido. Sorprende que muchos de los casos más graves de enfermedad por descompresión se resolvieran de forma espontánea. Hubo otros que no lo hicieron, dejando al infeliz lisiado de por vida. Además de estos casos graves, menudearon los incidentes con síntomas menores, dolores articulares en su mayoría.

El puente de Brooklyn, construido por la misma fecha que el de Saint Louis, también produjo víctimas. Veinte hombres murieron y muchos más tuvieron problemas neurológicos permanentes. Washington Roebling, ingeniero jefe, sufrió parálisis y tuvo que supervisar la terminación del puente desde la cama.

Los tratamientos modernos de la enfermedad por descompresión tienen sus orígenes en lo observado el siglo pasado, cuando se vio que los síntomas de aeroembolia mejoraban si los afectados volvían a entrar en el cajón presurizado, lo que es una consecuencia de la reducción del tamaño de la burbuja. Por esas fechas, Bert escribió que el respirar oxígeno puro ayudaba a aliviar los síntomas de aeroembolia en los animales. Hoy, casi todos los tratamientos consisten en recompresión y descompresión lenta mientras se respira oxígeno. Aun-



1. DURANTE LA DESCOMPRESION los buceadores usan una cuerda para mantener su posición a una profundidad especificada. El ascenso lento y gradual, con paradas obligatorias, reduce al mínimo la formación de burbujas en los tejidos y el riesgo de aeroembolias.

que es posible la mejoría cuando la recompresión se inicia horas o incluso días después del comienzo de los síntomas, es más probable un pronóstico favorable cuando la recompresión se acomete enseguida.

Quién está en situación de riesgo

En nuestros días el grupo de personas en situación de riesgo ha aumentado: buzos, obreros que trabajan en cajones neumáticos, pilotos que sufren caídas de presión cuando vuelan a grandes altitudes y astronautas que se ponen los trajes espaciales de baja presión antes de abandonar sus vehículos. Sólo en los Estados Unidos se registran alrededor de 900 casos cada año entre los buzos deportivos. Aunque se desconoce con precisión la incidencia de la enfermedad por descompresión, se ha calculado que entre los buzos deportivos de todo el mundo se produce un incidente por cada 5000 a 10.000 inmersiones. Para los buzos profesionales, que suelen enfrentarse a presiones más elevadas durante períodos más largos, el índice es de uno por cada 500 a 1000 inmersiones.

Pero en casi ningún caso de los reseñados puede descartarse, como causa, la práctica temeraria del buceo. Para evitar la enfermedad, los buzos usan tablas u ordenadores impermeables que les indican hasta qué profundidad pueden bajar y durante cuánto tiempo pueden estar sumergidos sin riesgo excesivo. Estas tablas se apoyan en el trabajo realizado en los primeros años del siglo XX por el fisiólogo británico John S. Haldane. Las tablas de Haldane y sus sucesoras redujeron drásticamente los porcentajes de enfermedad por descompresión y las cifras de casos graves. Con todo, en torno a la mitad de los casos de enfermedad por descompresión corresponde a buzos que aseguran haberse movido dentro de los límites especificados por una tabla normalizada (o por un algoritmo de ordenador, todos obtenidos por operaciones matemáticas similares a las de las tablas).

En parte, la razón de que la enfermedad por descompresión haya cedido con tanta parsimonia sus secretos reside en el hecho de que no se trata de una enfermedad simple, sino de un conjunto de dolencias débilmente relacionadas. La expresión de "enfermedad por descompresión" se usa tanto para la propia enfermedad por descompresión como para la embolia gaseosa arterial. Las dos, que son función de las burbujas, difieren fundamentalmente en el modo en que el gas entra en el organismo y, en cierta medida, en sus síntomas.

La embolia gaseosa arterial se produce cuando una vía respiratoria obstruida impide que escape de los pulmones el gas en expansión. Se da esta situación cuando un buzo novato o asustadizo retiene la respiración durante un ascenso rápido. A medida que disminuye la presión exterior al cuerpo del buzo, se va expandiendo el gas en los pulmones, que desgarra el órgano y escapa a la sangre. El síndrome se manifiesta también en virtud del bloqueo de parte del árbol bronquial, quizás a causa del asma o de una infección respiratoria. Siguiendo el flujo sanguíneo, esas burbujas llegan a la circulación arterial e incluso al cerebro. En la obstrucción del flujo sanguíneo, que deteriora el funcionamiento del tejido cerebral, si no lo aniquila, yace la explicación más verosímil de los síntomas comunes: pérdida súbita de la consciencia, convulsiones y parálisis de la mitad derecha o izquierda del organismo.



2. INCLINACION GRIEGA. Ese "andar tumbado", que la moda victoriana elevó a rango de elegancia, es propio de la enfermedad por descompresión. De ahí su denominación popular inglesa de "bends".

Las observaciones clínicas sugieren, sin embargo, que los mecanismos subyacentes de la enfermedad van más allá del mero taponamiento del torrente sanguíneo. A este respecto, algunos pacientes mejoran después de la recompresión para luego, y sin explicación alguna, deteriorarse (mucho después de que puedan quedar burbujas). Los experimentos con animales que ha realizado el equipo de Desmond F. Gorman han demostrado que después de una embolia aérea hay una reducción, lenta y estable, del flujo sanguíneo cerebral, aun cuando las burbujas se hayan eliminado por completo de los vasos. Algunas pruebas sugieren que esta persistencia de la patología podría deberse a la lesión causada por las burbujas en el endotelio (el revestimiento de los vasos sanguíneos) y la subsiguiente acumulación de leucocitos, lo que podría obstruir el flujo directa o indirectamente, a través de la liberación de mediadores químicos.

La enfermedad por descompresión es una consecuencia de las burbujas que se forman en los tejidos. Durante la inmersión, el gas inerte que causa la afección (normalmente nitrógeno o helio) entra en el organismo a través de los pulmones y, a las elevadas presiones de las profundidades oceánicas, se disuelve en la sangre. La circulación lleva este gas disuelto a los capilares; de aquí pasa, por difusión, a los tejidos. Esta difusión (hacia el interior de los tejidos en el descenso y hacia fuera de ellos en el ascenso) procede con rapidez en la médula espinal y el cerebro, porque los capilares se hallan muy juntos y tales órganos están bien perfundidos con sangre. Se trata de "tejidos rápidos", en los cuales el flujo sanguíneo es el controlador primario del intercambio de gases inertes. Según este criterio, las articulaciones son "lentas". Al estar peor perfundidas, la captación de gas y su eliminación es menos rápida. En el músculo esquelético, el intercambio gaseoso varía bastante. El flujo sanguíneo a través de los músculos de un buzo frío y en reposo se halla a un nivel bajo, pero puede decuplicarse en un buzo caliente que está haciendo ejercicio.

Arrastre del nitrógeno

Los tejidos corporales de un buzo que ha vuelto a la superficie y respira aire contienen una exceso importante de nitrógeno. Este gas captado durante la inmersión acaba arrastrándolo la sangre, que lo lleva a los pulmones, donde se exhala. Cuando la presión de todos los gases disueltos en los tejidos excede la presión ambiental exterior, se dice que los tejidos están supersaturados.

Bajo presión

En cuanto la técnica del buceo con aire comprimido permitió al hombre aventurarse hasta profundidades de casi 40 metros, se descubrió un peligroso efecto derivado de respirar nitrógeno presurizado: la narcosis, una suerte de borrachera que los poetas prefieren llamar el "éxtasis de las honduras".

Al final de los años treinta la Marina estadounidense empezó a sustituir por helio, menos narcotizante, el nitrógeno de las mezclas de respiración para las inmersiones profundas. El éxito fue tal, que durante un tiempo se creyó haber eliminado las barreras para el buceo en profundidad. En los años sesenta uno de los autores (Bennett) descubrió un nuevo obstáculo a unos 150 metros. Lo denominó síndrome nervioso de alta presión (SNAP).

Los signos y los síntomas de esta dolencia afectan al buzo presurizado en profundidad; en algunos aspectos resultan antagónicos a los de la narcosis por nitrógeno. El síndrome se caracteriza por vértigo, vómitos, temblores, fatiga, somnolencia, contracciones mioclónicas, calambres estomacales, reducción del rendimiento intelectual, sueño fisiológico escaso con sueños vívidos y pesadillas, así como cambios en la actividad eléctrica del cerebro (aumento de las ondas lentas) y microsueño, en los que los buzos permanecen conscientes sólo mientras se atrae su atención. Cuanto más profunda la inmersión y más rápida la velocidad de compresión, más graves los síntomas.



***UN RECORD DE PROFUNDIDAD** se estableció en 1981 al someter a los buzos a una presión equivalente a 686 metros.*

Los experimentos realizados por Bennett, en las postrimerías de los sesenta, sobre los efectos de los gases inertes en las membranas celulares configuraron un esbozo de causa responsable (y un remedio). A altas presiones, el nitrógeno, el argón y otros gases fisiológicamente inertes ejercen sus efectos narcóticos como si fueran anestésicos generales que, según se cree, inducen la expansión de las membranas de las neuronas. Bennet sospechaba que los mecanismos involucrados en éstos podrían participar también en el SNAP. Experimentos posteriores sugirieron que los gases narcóticos relajaban la tensión superficial de las membranas lipídicas, en tanto que los no narcóticos, helio o neón, la incrementaban, es decir, contraían las membranas.

Se planteó, por tanto, la hipótesis de que la adición de un 5 a un 10 por ciento de nitrógeno a una mezcla de helio y oxígeno se traduciría en una mezcla que no cambiaría la tensión superficial de la membrana y, por consiguiente, no causaría ni narcosis ni SNAP.

A principios de los setenta, Bennett utilizó una mezcla de este tipo en el hospital clínico de la Universidad de Duke. Esta nueva "trimix" mejoró los temblores y otros síntomas de SNAP. Durante ensayos realizados en 1981, en los que se usaron nuevas cámaras, los buzos fueron sometidos a compresión hasta presiones equivalentes a profundidades de 460 a 686 metros. Sin embargo, un ritmo rápido de compresión seguía provocando algunos SNAP. Añadíase a ello que la gran densidad del gas a tales presiones dificultaba su respiración.

La compañía de buceo francesa Comex ensayó una nueva mezcla en la que el nitrógeno se sustituyó por hidrógeno (la mitad de denso que el helio, pero aún ligeramente narcótico). Durante experimentos de buceo profundo en los que las presiones de hidrógeno superaban las 25 atmósferas, hubo episodios ocasionales en los que los buzos sufrían efectos debilitantes, como psicosis o experiencias "extrasensoriales". En 1989, sin embargo, se usó satisfactoriamente una mezcla de oxígeno al 1 por ciento en iguales proporciones de hidrógeno y helio en una inmersión oceánica a 500 metros (con excursiones a 520 y 534 metros) y en 1993 en una inmersión simulada (en una cámara) a una profundidad de 701 metros.

Estas inmersiones precisaron unos siete días de compresión y más de 30 días de descompresión. Como los astronautas, los buzos perdieron peso y acondicionamiento cardiovascular. Aunque a un gran costo, suelen acumularse revelaciones inestimables en el cuerpo humano cuando se fuerzan los límites de su ambiente en el espacio exterior o en las profundidades marinas. *R. M., R. V., P. B.*

En ese intervalo pueden formarse burbujas, a la manera como se generan en un envase de un refresco carbonatado cuando se abre. Las técnicas ecográficas han puesto de manifiesto las burbujas del torrente sanguíneo de los buzos y los aviadores sometidos a descompresiones súbitas de tan sólo 0,3 atmósferas.

Paradójicamente esas burbujas no parecen formarse dentro de la sangre. Los experimentos realizados por Erasmus Darwin, abuelo del creador de la teoría de la evolución por selección natural, demostraron ya que si está encerrada herméticamente en su recipiente natural (un vaso) y aislada de la circulación, la sangre no forma burbujas aun cuando persista intensamente descomprimida. Observaciones que recibieron confirmación en nuestro laboratorio, donde no pudimos detectar burbujas en la sangre de una vena aislada, ni siquiera después de haberla descomprimido desde 122 atmósferas. Por consiguiente, se necesita algo más que la mera supersaturación para que se formen esos globos de gas.

Por otro lado, la técnica de rayos X ha permitido descubrir bolsas de gas en las articulaciones, así como en el interior y alrededores de la columna, incluso sin descompresión; las bolsas se forman como consecuencia de la adhesión viscosa entre superficies hísticas móviles. Sirvan de ejemplo los "crujidos" de las articulaciones, que no son sino la generación y destrucción audible de una burbuja. El gas residual de esas bolsas puede actuar a modo de núcleos a partir de los cuales se forman las burbujas que causan la enfermedad por descompresión. Esos núcleos se hallan fuera del sistema vascular (que transporta la sangre); ahora bien, conforme van expandiéndose, podrían rasgar los diminutos capilares y sembrar así de burbujas la sangre circulante. Un fenómeno relacionado puede observar-

En las profundidades del abismo (ida y vuelta)

Las formas orgánicas singulares no constituyen ninguna novedad en las profundidades marinas y de agua dulce. En los últimos años, sin embargo, han multiplicado su número: una productora británica que hurga en los restos del *Lusitania*, a 100 metros de la costa irlandesa, el anestesista de Indianápolis que pasa sus vacaciones en cuevas negras como boca de lobo, buceando a centenares de metros por laberintos acuáticos terrestres, y el analista de sistemas que respira neón y oxígeno mientras rebusca en galeones hundidos a 120 metros de profundidad.

Bienvenidos al mundo del buceo profesional, en el que ningún pecio parece demasiado profundo, ninguna cueva demasiado larga, ninguna mezcla de respiración demasiado esotérica y ninguna pieza del equipo demasiado costosa.

El buceo técnico difiere de las escafandras convencionales en la misma medida en que un ascenso al Everest no es un paseo por el parque, me explica Richard D. Vann. La diferencia crucial, añade, es que "hay una cumbre para la montaña, pero no hay un límite real para la profundidades deseadas por los buzos: descienden cada vez más y más; y con cada descenso aumenta la certeza de que no saldrán indemnes, si emergen con vida".

En los últimos años la actividad se ha consolidado con revistas, muestras comerciales y excursiones submarinas organizadas. Aunque hubo una época en que parecía pasión de aventureros, sin miedo al riesgo, la verdad es que el buceo deportivo con escafandra es ahora tan seguro como el esquí. La metamorfosis se ha conseguido tras largos años de perfeccionamiento del equipo y de entrenamiento. El buceo deportivo se ha limitado al uso de aire comprimido ordinario para respirar y a tiempos y profundidades de inmersión que no precisan descompresión por etapas en el ascenso, restricciones éstas que han impuesto un límite de profundidad de 39 metros, a la cual las tablas normalizadas recomiendan que un buzo no pase más de 10 minutos, salvo que se haya planificado una descompresión por etapas.

Para la gran mayoría de los buzos el límite de 39 metros no es oneroso. Los profesionales, sin embargo, usan métodos y equipo depurados para alcanzar mayores profundidades. La práctica "revela lugares que no se pueden ver de otra forma, como restos de barcos naufragados y cuevas", dice Michael Menduno, editor de *aquaCorps*, una revista bimensual dedicada al buceo profesional. "No es fácil y conlleva cierto peligro", añade Billy Deans, un veterano y respetado pionero. "Pero ahora es posible llegar hasta unos 90 metros con un grado aceptable de riesgo."

Aceptable, claro, para los buzos expertos con dinero que dilapidar. Sólo la preparación puede costar varios cientos de miles de pesetas. Y no es infrecuente que un profesional exigente lleve a cuestas un millón largo de pesetas en equipo, en el que se incluyen pañales (una inmersión a 80 metros, con su descompresión por etapas, puede durar al menos dos horas y media).

EL BUZO TECNICO Billy Deans nos muestra lo que lleva para bajar a más de 70 metros.

Por el privilegio de pasar media hora en el suelo marino a 77 metros un buzo necesitaría al menos cuatro tanques independientes, cada uno con su propio dispositivo respiratorio, o "regulador". Dos grandes botellas de una "trimix" de oxígeno, helio y nitrógeno, que se portan en la espalda, cubrirían el descenso, un intervalo de 30 minutos abajo y tan sólo la mitad del ascenso. Botellas más pequeñas de "nitrox-2" (oxígeno al 36 por ciento y nitrógeno al 64 por ciento) y oxígeno puro, atadas con correas a los lados del cuerpo, se usarían durante la descompresión, por encima de los 34 metros. Las paradas de descompresión (12 en total) empezarían a los 37 metros y continuarían a intervalos de tres metros durante el regreso a la superficie.

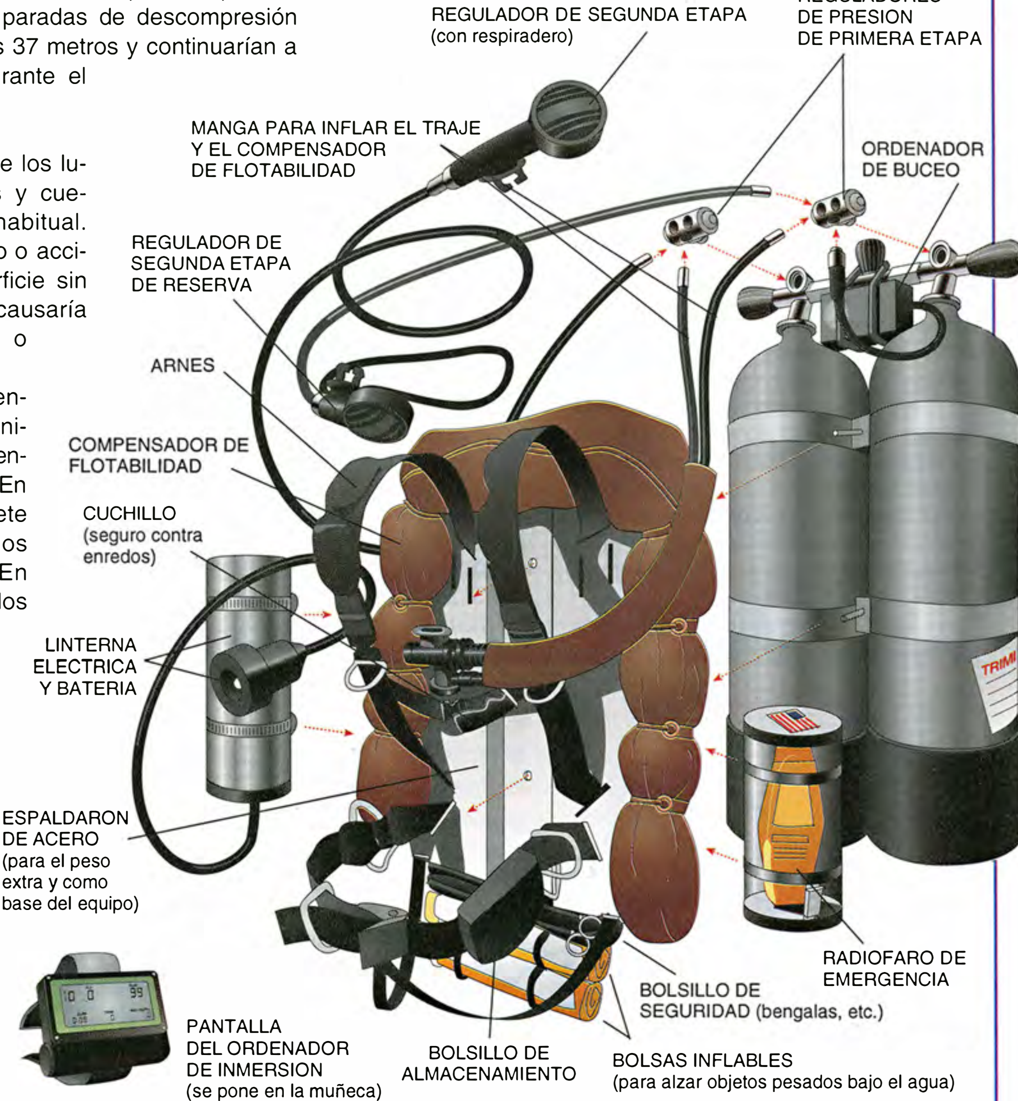
El mayor riesgo proviene de los lugares cerrados (pecios y cuevas), que son el destino habitual. Amén de los fallos del equipo o accidentes. Un ascenso a superficie sin la descompresión adecuada causaría casi con certeza parálisis o muerte.

Las cuevas son especialmente peligrosas por las oportunidades que brindan para desorientarse o quedar atrapado. En 1993 murieron en cuevas siete exploradores norteamericanos perfectamente entrenados. En 1994, murieron dos, entre ellos Sheck Exley, un buzo técnico pionero y muy admirado. El pasado mes de marzo murieron otros dos en una cueva mexicana. Además, en los últimos años han ocurrido una serie de muertes en los restos del naufragio del *Andrea Doria* (unos 60 buzos han muerto en los restos, alrededor de una docena más de los que murieron ahogados cuando se hundió el barco en 1956).

Vann recuerda a un buzo empedernido de cuevas que compartía su convicción de que "lo más increíble del mundo es nadar a través de esa estrecha apertura hacia el interior de una sala enorme que nadie ha visto antes". Este buzo murió en la estrecha apertura de una cueva de Florida no mucho tiempo después.

Dicho sea en su honor, la comunidad de buceo técnico parece hacer pocos intentos, o ninguno, para quitar importancia al peligro. A diferencia de otras publicaciones de buceo con ánimo de lucro, *aquaCorps* publica "informes de incidentes" escalofriantemente detallados en cada edición. "Creo que es importante seguir espoleando la cuestión de la seguridad", dice el editor Menduno.

Deans, el propietario de Key West Diver, Inc., uno de los servicios más antiguos de instrucción de buceo técnico, no ha tenido ninguna muerte ni lesión grave en los cinco años en los que ha estado ofreciendo esta clase de preparación. No en vano enfrenta a sus futuros estudiantes con su mortalidad obligándoles a ver una cinta de vídeo en la que se muestra "la recuperación del cuerpo de un individuo extremadamente loco que se sumergió [y murió] en el *Andrea Doria*". Cuando se grabó la cinta, "el rigor mortis se había instalado... No es una bonita visión. Da la casualidad de que era mi mejor amigo".



Aunque el perfeccionamiento del equipo y del entrenamiento reducirá sin duda el riesgo derivado del buceo, como ocurrió con las escafandras deportivas, el peligro parece en cierto modo inherente a la actividad. Para algunos, forma también parte de la experiencia. "Siempre hay una franja de lunáticos que salen pensando en que podrían no volver", dice Menduno. "Son gente con la que no me sumergiría."

Glenn Zorpette, del equipo editorial.

se en un vaso de cerveza, en el que las burbujas tienden a emanar desde las grietas de la pared llenas de gas.

Los múltiples síntomas de la enfermedad por descompresión resultan de las diversas combinaciones de burbujas intravasculares y extravasculares. El dolor articular, por ejemplo, se debe probablemente a que las burbujas invaden las terminaciones nerviosas y tensan los tejidos que rodean las articulaciones. El entumecimiento o la parálisis están causados por la presencia de burbujas en la médula espinal, que altera físicamente las células nerviosas y su circulación. La tos y la disnea (la aeroembolia cardiorrespiratoria o los "ahogos") vienen provocadas por el gran número de burbujas gaseosas venosas que afectan a los capilares pulmonares.

Atajo a las arterias

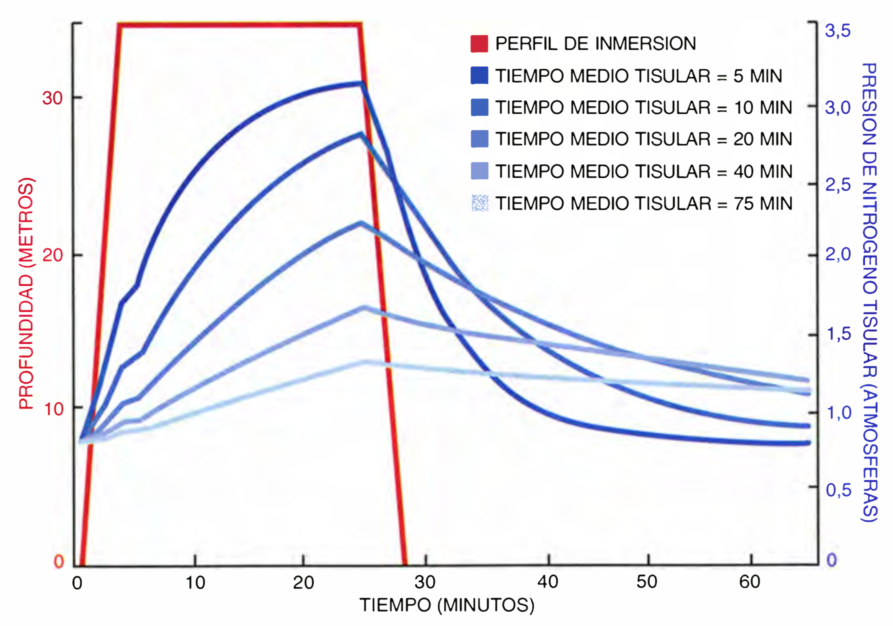
Además de estos efectos directos, parecen probables otros secundarios. En cuanto cuerpos extraños, las burbujas pueden activar el sistema de la coagulación, exacerbando el bloqueo del flujo sanguíneo. Las pruebas reunidas por Charles A. Ward apuntan al complemento, un grupo de moléculas que circulan en la sangre e intervienen en la defensa contra las infecciones.

Aunque comprometidas en todas las formas de enfermedad por descompresión, las burbujas no encierran por sí mismas ningún problema. Amén de los autores, Richard Dunford y otros han empleado dispositivos ecográficos en el examen de los buzos deportivos tras sus excursiones submarinas; hemos encontrado así que las burbujas sobreabundan en el sistema venoso, el ventrículo derecho y la arteria pulmonar. Cabe suponer que esas burbujas venosas son inofensivas porque suelen ser filtradas por la red capilar pulmonar y después exhaladas.

Pero si hay suficientes puede superarse la capacidad de filtración de los capilares pulmonares, flanqueándoseles el paso al sistema arterial. También, una dolencia cardiaca puede permitir que las burbujas vayan directamente de la mitad derecha del corazón a la mitad izquierda (desviando la circulación a los pulmones), con un resultado más o menos similar. Las burbujas que entran así en la sangre arterial podrían alcanzar el cerebro y provocar trastornos de visión, habla, pensamiento, personalidad o consciencia.

La condición cardíaca acostumbrada es la de un foramen oval permeable, pequeña apertura entre las aurículas derecha e izquierda, presente en el 10 al 20 por ciento de la población. Mediante ecocardiografía de contraste de burbuja puede detectarse el foramen oval permeable observando el paso de las burbujas desde la aurícula derecha a la izquierda. Otra afección, más rara, conocida como defecto del septo auricular, podría ejercer parecido efecto.

En 1986 empezamos a buscar un foramen oval permeable en todos los pacientes ingresados por enfermedad por descompresión. Si la existencia de esta dolencia aumenta el riesgo de enfermedad por descompresión, razonábamos, predominará entre los buzos que han sufrido la patología. Nuestros estudios demostraron que podía detectarse un foramen oval permeable en la mitad de los buzos que habían padecido enfermedad por descompresión neurológica grave, lo que sugería una probabilidad cinco veces mayor de que los individuos con esta afección sufrieran graves problemas por descompresión. Aunque sin pruebas concluyentes, esa correlación estadística nos alentó a seguir estudiando el mecanismo.



3. LAS PRESIONES DE NITROGENO de los tejidos aumentan y disminuyen a un ritmo diferente durante una inmersión y poco después; depende sobre todo del flujo sanguíneo de los tejidos afectados. Aquí se muestran las presiones en cinco tejidos, cada uno con un "tiempo medio" distinto (el tiempo necesario para que el nitrógeno de los tejidos alcance la mitad de su máximo posible). Cuando la presión del gas disuelto supera la presión ambiental, se dice que los tejidos están supersaturados. La supersaturación es necesaria para la formación de burbujas, que provocan la enfermedad por descompresión. Estas curvas son sólo una aproximación al comportamiento real de los gases en los tejidos, que es en realidad más complejo y apenas conocido.

Síntomas neurológicos enigmáticos

Otra prometedora área de investigación atañe a las dos principales formas de enfermedad neurológica por descompresión, la cerebral y la espinal. Presentan modelos sintomatológicos claros, con daños de la médula espinal que afectan sobre todo a la parte inferior del organismo: debilidad en las piernas, pérdida de sensación y deterioro del control vesical e intestinal. Las burbujas cerebrales, por el contrario, suelen manifestarse como hemiplejía (parálisis de uno de los lados del cuerpo), dificultad para hablar, alteración de la consciencia, cambios de personalidad o convulsiones; estos síntomas cerebrales son relativamente infrecuentes. Ahí se encierra uno de los misterios de la enfermedad por descompresión neurológica: ¿por qué la médula espinal resulta afectada con mucha mayor frecuencia que el cerebro?

La enfermedad cerebral por descompresión parece causada por las burbujas que entran en el cerebro a través de la sangre arterial. Estas burbujas pueden tener varios orígenes, como ya se comentó antes. Los estudios realizados por James Francis, por un lado, y G. Pezeshkpour, Drew Dutka, John M. Hallenbeck y Ed T. Flynn, por otro, han demostrado, además, que es mucho más probable que la enfermedad espinal esté causada por las burbujas que se forman dentro de la sustancia medular. Cierta hipótesis, avanzada para explicar las diferencias de frecuencia y de lugares de formación de burbujas, se

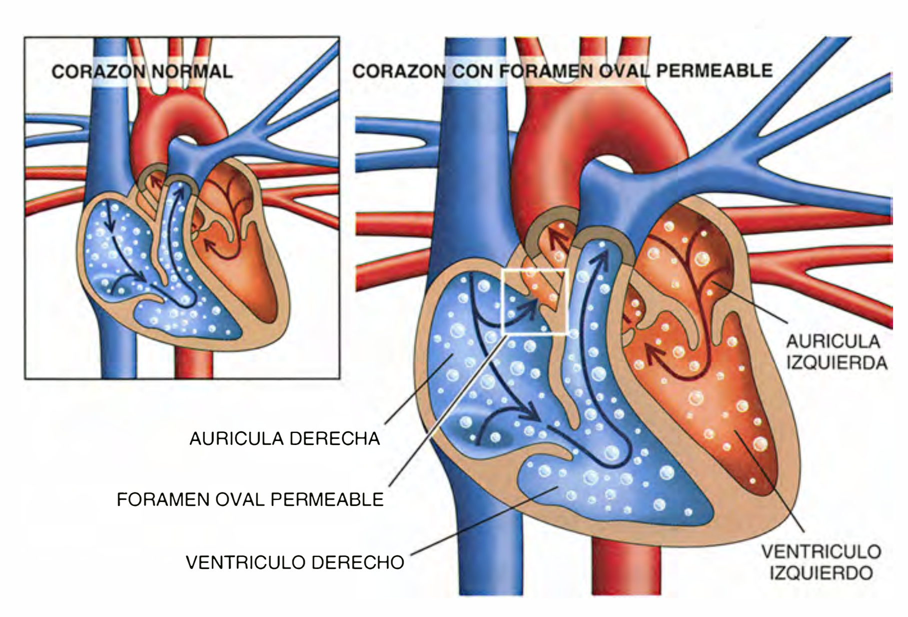
basa en el movimiento continuo a que se halla sometida la médula espinal; lo mismo que en las articulaciones, el movimiento podría generar núcleos de burbujas por adhesión viscosa. Además, la médula espinal está encerrada por una membrana de tejido conjuntivo relativamente inelástico. Considerando este hecho, Brian A. Hills y Philip B. James presentaron pruebas experimentales en 1982 de que el desarrollo de burbujas dentro de la sustancia de la médula espinal podía aumentar la presión y causar una reducción secundaria del flujo sanguíneo, agravando la lesión iniciada por las burbujas.

Un buceo más seguro

Reducir el riesgo de acceso de las burbujas al sistema venoso parece una buena idea porque así entraría una menor cantidad en el sistema arterial a través del paso transpulmonar o del foramen oval permeable. Para ello pueden resultar útiles los ascensos lentos y graduales. Los estudios realizados en animales han demostrado una mayor caída del número de burbujas cuando remite la presión a una ritmo correspondiente a una velocidad de ascenso de nueve metros por minuto que cuando se hace a 18 metros por minuto, la velocidad tradicionalmente aconsejada a los buzos.

Se consigue un resultado muy parecido con una "parada de seguridad" de varios minutos a una profundidad de cinco o seis metros. (Hablamos de las paradas propias de inmersiones cortas que no precisan las paradas de descompresión obligatorias especificadas por las tablas de descompresión normalizadas.) Donna Uguccioni demostró que una parada de seguridad de tres minutos a seis metros reduce las burbujas venosas en un 50 por ciento. Además, el ascenso lento y las paradas de seguridad ofrecerían a los tejidos neurológicos de rápido intercambio, como el cerebro y la médula espinal, tiempo suficiente para eliminar el exceso de gas inerte, reduciendo así el grado de supersaturación y la posibilidad de formación de burbujas.

Otro método de reducción de la tensión del nitrógeno disuelto, que induce la formación de burbujas, consiste en respirar concentraciones mayores de oxígeno. Cuando la presión de nitrógeno en los tejidos es mayor que en la sangre, el gas pasa a la circulación, que lo transporta a los pulmones para su expulsión. Cuanto mayor es la diferencia de presión, mayor la velocidad de eliminación



4. DENTRO DEL CORAZON NORMAL, la sangre venosa (*azul*) se separa de la sangre arterial (*roja*), que es bombeada a los tejidos, y así casi todas las burbujas venosas son atrapadas por los capilares pulmonares. Ahora bien, al menos el 10 por ciento de la población tiene una pequeña apertura entre la aurícula izquierda y la derecha, conocida como el foramen oval permeable, el cual puede permitir que las burbujas atraviesen el sistema arterial, dañando el cerebro y otros órganos.

del gas. La respiración de oxígeno puro refuerza esa diferencia de presión. Aun cuando se hayan formado burbujas, el oxígeno sigue siendo útil, porque la eliminación de aquéllas depende de la diferencia de presión de nitrógeno entre la burbuja y el tejido circundante.

Este efecto se conoce desde hace casi un siglo y ha posibilitado varias aplicaciones diferentes del oxígeno en el buceo, dentro y fuera del agua. Casi todo el buceo deportivo se practica utilizando aire comprimido ordinario, pero algunas técnicas avanzadas exigen mezclas respiratorias que contengan algo distinto del habitual 21 por ciento de oxígeno. Por ejemplo, en las paradas de descompresión obligatorias el buzo respira a veces oxígeno puro. Los profesionales usan mezclas "nitrox" de aire enriquecido, que contienen un 32 o un 36 por ciento de oxígeno. La mayor proporción de oxígeno permite al buzo permanecer algo más tiempo a una profundidad determinada sin necesidad de descompresión por etapas o bien usar el mismo perfil con un menor riesgo de enfermedad por descompresión.

El respetar los límites de profundidad es importante cuando se respiran estas mezclas con alto contenido de oxígeno, porque, en la mezcla, el oxígeno puede producir efectos tóxicos cuando su presión supera las 1,5 a 1,7 atmósferas. Para una mezcla nitrox con un 32 por ciento de oxígeno, por ejemplo, el extremo más seguro de este límite de profundidad se hallaría en unos 37 metros. En su forma más grave, la toxicidad por oxígeno se manifiesta por convulsiones generalizadas que pueden traducirse en ahogamiento.

Tablas de cómputo más seguras

¿Cómo acoplamos el conocimiento de la fisiología de la enfermedad por descompresión con el desarrollo de tablas de descompresión y algoritmos de ordenador más seguros y eficaces? La incorporación de conceptos fisiológicos en modelos matemáticos puede facilitar las excursiones subacuáticas y reducir al máximo el riesgo de problemas. Esta clase de modelos calcula la presión del gas inerte en los diversos tejidos perfundidos a diferentes velocidades. Se supone que las burbujas se forman cuando los tejidos se supersaturan por cierto factor, normalmente en torno a dos. Este tipo de modelo lo inventó Haldane hace casi un siglo.

Con el transcurso del tiempo el planteamiento básico se ha ido refinando en múltiples ocasiones, pero sigue sin ser totalmente satisfactorio. Avances recientes, sin embargo, han mejorado el modelo o prometen hacerlo. Quizás el progreso más importante haya sido admitir que el evitar la enfermedad por descompresión es una cuestión de probabilidad y no una tajante línea divisoria entre lo seguro y lo inseguro.

Esta conclusión, a la que llegaron, mediados los ochenta, Paul K. Weathersby, Louis, D. Homer y Flynn, se basa en los modelos que calculan la probabilidad de desarrollo de la enfermedad por descompresión para una inmersión dada.

Para que estén bien construidos, los modelos precisan grandes bases de datos con detalles precisos de centenares de inmersiones que se tradujeron en enfermedad por descompresión así como de millares que no tuvieron este resultado. Estas bases de datos suelen ser caras y difíciles de crear; por fortuna, los ordenadores que llevan consigo muchos buzos facilitan las cosas. Se trata de ordenadores que miden y registran la profundidad y actualizan continuamente los cálculos del nitrógeno hístico; además, pueden transferir los datos a ordenadores personales en superficie.

La importancia del método probabilístico radica en su planteamiento más realista de la noción de seguridad. Como esquiar o conducir un coche, bucear tiene riesgos que pueden reducirse, pero nunca eliminarse del todo. En este contexto, pues, entenderemos por seguridad el grado de probabilidad de padecer la enfermedad por descompresión que un buzo está dispuesto a aceptar. Algún día los ordenadores de buceo basados en modelos probabilísticos deberían reflejar esta realidad ofreciendo a los buzos la posibilidad de indicar el grado de probabilidad con la que se sienten confortables en sus maniobras de inmersión.

Lo ideal sería que estos modelos fueran sensibles a las variaciones individuales. Los modelos actuales se aplican a un buzo "promedio". Pero no sirven para todos; por ejemplo, para el turista que tratamos en 1988 y quienes padecen afecciones específicas u otras condiciones. Incluso los buzos no afectados por esas dolencias están sujetos a fatiga, estrés, variabilidades inmunológicas y otros factores que influirían en su sensibilidad de un día a otro.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

KEY DOCUMENTS OF THE BIOMEDICAL ASPECTS OF DEEP-SEA DIVING: SELECTED FROM THE WORLD'S LITERATURE, 1608-1982. Sociedad Médica Submarina e Hiperbárica, Bethesda, 1983.

THE PHYSIOLOGY AND MEDICINE OF DIVING. Cuarta edición. Dirigido por Peter B. Bennet y Davir H. Elliot. W.B. Saunders, 1993.

DIVING AND SUBAQUATIC MEDICINE. Tercera edición. Carl Edmons, Christopher Lowry y John Pennefather. Butterworth-Heinemann, 1994.

Comunicación en las ranas

Para ser oídos por parejas y rivales, estos anfibios han desarrollado una amplia gama de estrategias complejas

Peter M. Narins

Cuando el sol traspone, la ladera de El Yunque, en Puerto Rico, empieza a bullir de sonidos. No son melodías precisamente. Las llamadas de miríadas de animales del bosque crean una sorda cacofonía, similar al ruido de un metro que pasa a seis metros de distancia. Hay un bramido, en particular, que hace que mis alumnos inexpertos se sobresalten, se lleven las manos a los oídos y exclamen: "¿Qué es eso?" Se trata del coqui, *Eleutherodactylus coqui*; este anfibio de 36 milímetros de longitud es la estrella, por sorprendente que parezca, de los arrullos locales.

En 1970, cuando andaba en busca de un proyecto de investigación en comunicaciones, tropecé con Robert R. Capranica, de la Universidad de Cornell. Explicaba cierto experimento con la rana toro norteamericana. Sintetizando electrónicamente su canto de apareamiento, lo transmitía a un macho cautivo, que al instante emitía un bramido similar. Pero cuando Capranica reprodujo los cantos de otras 34 especies de ranas y sapos, la rana toro no respondió ni una sola vez. Descubrió también que se necesitaban las dos bandas de frecuencia presentes en el canto para desencadenar una respuesta.

Empecé a preguntarme por la relación entre las sutilezas de tales sonidos y el entorno natural donde se desenvuelven las ranas. En ello sigo, veinte años después. En buena medida, los cantos parecen ser las soluciones adoptadas ante el reto que supone el procesamiento de señales en presencia de ruido. La mayoría de las ranas viven en pluviselvas, sede asimismo de otros animales emisores de señales. El número exiguo de sonidos que produce un macho de rana ha de distinguirse fácilmente de los emitidos por otros individuos y especies de este ambiente acústicamente complejo. (Las ranas hembra rara vez cantan.)

La separación espectral, una estrategia de los anfibios, nos es familiar porque se emplea en radiodifusión: las emisoras de una gran ciudad, por ejemplo, transmiten cada una dentro de un segmento diferente del espectro electromagnético. En la pluviselva, los "usuarios" anfibios del espacio acústico podrían también ocupar canales privados: diríase que cada especie de rana del Bosque Nacional Caribeño, en el que se ubica El Yunque, canta dentro de una banda de frecuencias propia, no compartida con ningún otro grupo. Dicha separación persiste aunque las frecuencias se vean limitadas por otros factores. Las ranas grandes tienen la voz grave, es decir, cantan a frecuencias bajas; las ranas pequeñas emiten agudos gorjeos. En El Yunque, los coquis de tamaño mayor viven a más altitud y sus voces son más graves. Las ranas de ambientes fríos repiten sus llamadas a un ritmo más lento, pues los múscu-

1. MACHOS DE COQUI rivalizan por la atención de una hembra (*izquierda*), sometiéndola a sonidos tan fuertes como los producidos por un camión de 18 ruedas a siete metros de distancia.



los que controlan los sonidos trabajan más despacio.

Las especies sacan buen rendimiento de las frecuencias de las que se apropian. El coqui tienen un canto simple, de dos notas, que suena *co-qui*. La nota del *co*, de unos 1160 hertz (para un macho a una altitud de 900 metros), parece indicar la delimitación de su territorio frente a otros machos: al ofrecer, nosotros, a un macho emisor las llamadas de otro, observamos que el primero abandonaba su nota *qui* y cantaba sólo *co*. Al primer macho no le importaba si el canto se cambiaba electrónicamente a *qui-co*. La nota *qui*, por otra parte, seduce a las hembras. La investigación neurofisiológica ha revelado que una población extensa de neuronas auditivas, exclusivas de las hembras de coqui, tienen la máxima sensibilidad alrededor de los 2090 hertz, en el rango de frecuencia del *qui*.

Además de compartir el espectro, las ranas comparten el tiempo. Algunas restringen su canto a ciertos momentos del día. El coqui de la isla de Puerto Rico canta desde la puesta de sol hasta medianoche, y lo hace cada pocos segundos. Los coquis mayores cantan una vez cada cuatro segundos; los más pequeños gorjean cada dos segundos. Tales sonidos, merece la pena resaltarlo, pueden sincronizarse para que encajen en los breves instantes en que callan los vecinos del entorno.

Con Randy Zelick me propuse medir la precisión con que una rana es capaz de colocar sus cantos para evitar el solapamiento temporal con otro sonido fuerte. Bombardeamos a machos de coqui con andanadas de tonos puros; repetidos cada 2,5 segundos, coincidían con la cadencia natural de sus llamadas. Aumentamos gradualmente la duración de los tonos de interferencia. Pues bien: aun cuando nuestra emisión ocupara el 90 por ciento de su período normal de llamada, la rana era capaz de iniciar sus vocalizaciones en la estrecha ventana de (relativo) silencio.

Para comprobar si los machos inferían, de la periodicidad de nuestros sonidos, la presencia de un hueco, emitíamos aleatoriamente tonos de dos duraciones distintas, separados por intervalos de 750 milisegundos. Los anfibios seguían evitando la coincidencia con los sonidos fuertes. En ellos, como en todos los animales, las funciones periódicas se atribuyen a oscilaciones de un circuito neuronal. La hazaña del coqui supone que los circuitos periódicos que impulsan los músculos vocales pueden establecer-

PETER M. NARINS enseña fisiología en la Universidad de California en Los Angeles.

se de nuevo en cada ciclo; circuitos periódicos que, en efecto, se ponen en marcha al abrirse un hueco.

¿Cantaría el coqui durante la "ventana" si, en vez de interrumpir el sonido de interferencia, llenábamos ese intervalo de silencio con otro sonido menos fuerte? Zelick y el autor ofrecieron a 23 machos de El Yunque un sonido de control de 1,5 segundos con un tono similar al del canto del macho objeto de estudio. El sonido era inmediatamente seguido por un tono de "prueba" de 1 segundo. Esta secuencia se repetía cada 2,5 segundos, idéntica cadencia que la de su canto. Aumentamos el volumen de este tono de prueba hasta que el animal dejaba de aferrarse a la ventana, quizá porque ambos tonos le parecían ya igualmente fuertes.

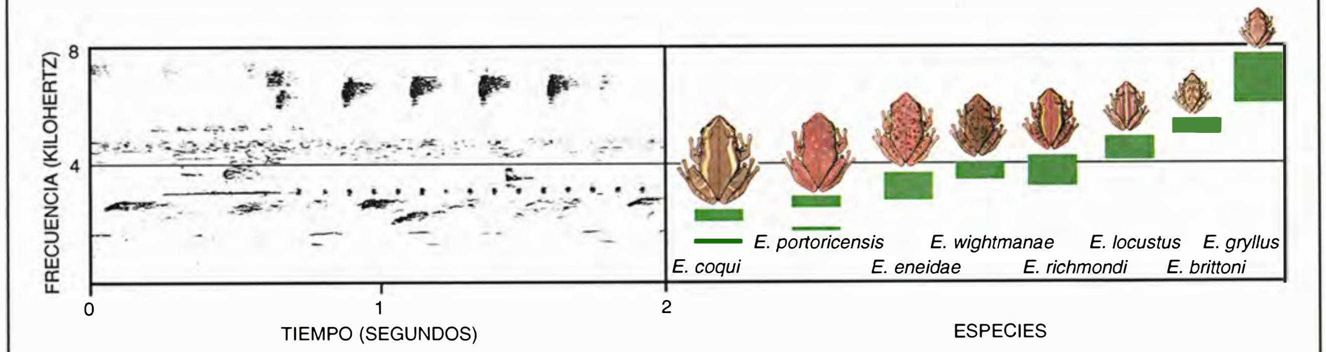
Sin embargo, nada menos que el 59 por ciento de los machos conseguían colocar sus cantos en la ventana cuando el tono de prueba distaba del tono de control tan sólo entre cuatro y seis decibelios (una diferencia apenas discernible, para el hombre, del ruido de fondo de la selva). Bastaba, tal parecía, una diferencia de intensidad tan pequeña para volver a reconfigurar su oscilador neural.

Pese a esa finura de adaptación, no siempre resulta posible repartir nítidamente frecuencias y tiempos entre todas las especies locales de ranas. De ahí que se hayan desarrollado por evolución otras varias estrategias. Los machos de muchas especies producen un canto periódico, estereotipado, que aumenta la redundancia, que permite identificarlos y localizarlos aun cuando su canto pudiera quedar ahogado. Además, el tímpano y otras partes de los receptores auditivos de un anfibio están ajustados al tono y al período del canto propio de la especie en cuestión, lo que permite una audición fina y selectiva.

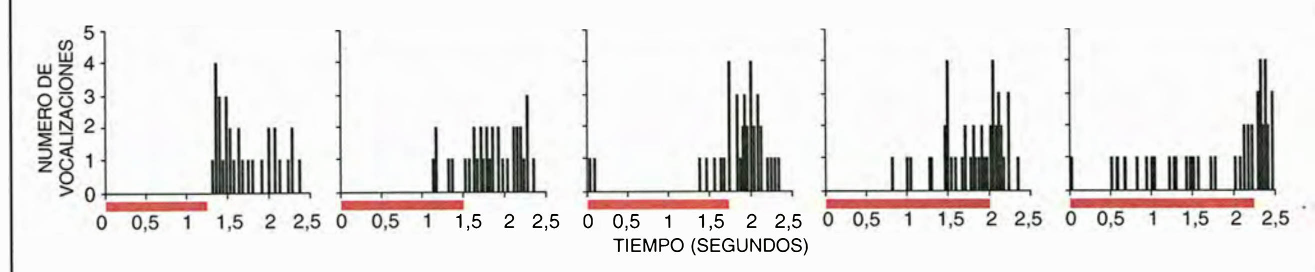
Con mucho, la adaptación más evidente es la relativa a la intensidad sonora. En las zonas forestales hay un coqui macho por cada 10 metros cuadrados de terreno; se ve, pues, sometido a una fuerte presión para ahogar los cantos de sus vecinos en beneficio de una hembra lejana. Un coqui situado a medio metro de distancia canta a unos 90 o 95 dB NPS, cerca del umbral de dolor en el hombre. (Con el parámetro NPS, o nivel de presión sonora, se designa la me-

Compartir el espectro y el tiempo

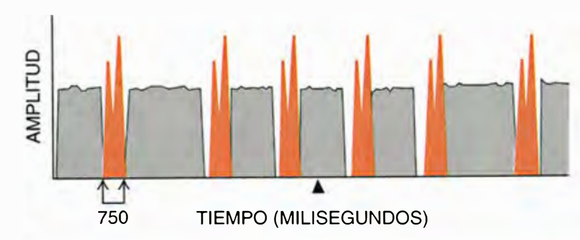
El tono y la sincronización ayudan a distinguir los cantos de los animales del bosque. Un espectrograma sonoro de dos segundos analiza las frecuencias de los sonidos emitidos por ranas de la familia Eleuterodactílidos (*abajo*). Además de repetir sus señales a ritmos diferentes, cada especie ocupa un rango de frecuencia bien definido (*bandas verdes*).



Los experimentos realizados con un macho de *E. coqui* demuestran que el animal sincroniza sus cantos para evitar que coincidan con los de sus vecinos (*abajo*). Al coqui se le hizo oír un tono fuerte de distinta duración (*barras rojas*), repetido 65 veces, cada 2,5 segundos, para simular el ritmo de las señales propias de la rana. Incluso cuando el tono ocupaba 2,25 segundos de su período de canto (*extremo derecho*), el coqui podía colocar la mayoría de sus cantos en la "ventana" de silencio de 0,25 segundos.



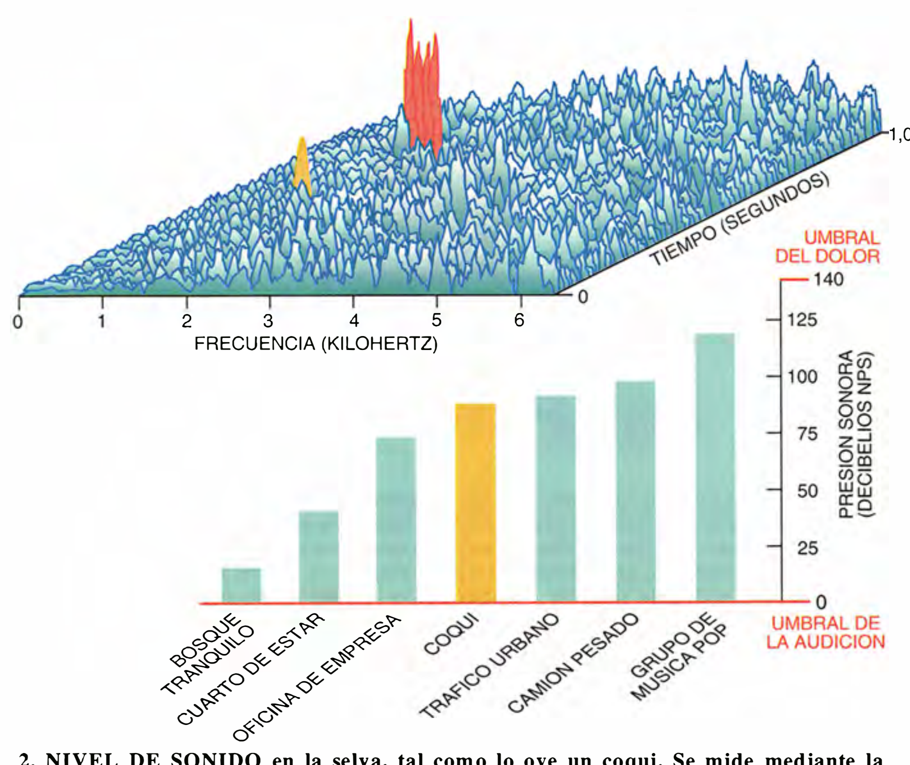
Además, un coqui puede cantar dentro de esa rendija, aun cuando su canto no retorne periódicamente y sea, pues, impredecible (*derecha*). En una secuencia aleatoria se emitían dos notas de distinta duración (*gris*), separadas por intervalos de 750 milisegundos. El coqui cantaba (*picos anaranjados*) en esas ventanas. Si hubiera seguido emitiendo señales al ritmo de los dos primeros cantos, el tercer canto hubiera coincidido (*punta de flecha*) con un tono de interferencia.



nor diferencia de presión audible por el oído humano a 1000 hertz, P_0 = 0,0002 dinas por centímetro cuadrado. Las presiones de sonido P se dan en decibelios con respecto a este patrón, siendo dB = 20 log P/P_0. Un martillo neumático, por ejemplo, produce un ruido de 100 dB NPS.) En virtud de ese esfuerzo, el macho se halla expuesto a niveles potencialmente dañinos del sonido de su propio canto durante 11 meses del año.

Interesado por la manera en que un animalillo tan chico se protegía de su propia barahúnda, decidí medir la intensidad con que sonaba a su oído. Comenzaba a atardecer en la estación de campo El Verde; percibí que un coqui gorjeaba en la vegetación de los alrededores. Instalé un micrófono sonda a unos 13 a 35 milímetros de su tímpano. A esa distancia, los niveles máximos de sus notas *co* y *qui* alcanzaban unos ensordecedores 114 y 120 dB NPS, respectivamente.

Aunque estas presiones externas son muy altas, la magnitud en que se mueve el tímpano (y, por tanto, en que excita o posiblemente hiperexcita su fino oído interno) depende también de la presión en el interior del tímpano. Los machos de rana vocalizan comprimiendo los pulmones con los orificios nasales y la boca cerrados. Envían el aire contra las cuerdas vocales y hacia el interior de un sistema cerrado de cámaras que incluye la cavidad bucal. Entonces, el saco de finas paredes que se halla en la base de la boca se hincha como un globo, emitiendo el canto desde las cuerdas vocales al ambiente.



2. NIVEL DE SONIDO en la selva, tal como lo oye un coqui. Se mide mediante la velocidad máxima de las vibraciones del tímpano de la rana (*arriba*). La membrana responde al propio canto del coqui: *co-qui* (*co* es amarillo, *qui* es rojo); los picos de frecuencia más alta los producen otras ranas e insectos. La intensidad sonora del coqui (*abajo*) sitúa a este anfibio en la misma clase que el tráfico urbano.

Para averiguar cuánto se mueve el tímpano cuando el coqui canta, recolecté 10 de los machos más ruidosos que había por los alrededores de El Verde y volé con ellos a la Universidad de Constanza. Me había puesto de acuerdo para trabajar con Günther Ehret y Jürgen Tautz; disponían éstos de un vibrómetro de láser Doppler (VLD), que produce un haz de láser de helio-neón de baja potencia. Cuando el haz se dirige al tímpano de un macho, algo de la luz dispersada por la membrana vuelve a penetrar en el láser. Si el tímpano permanece estacionario, la longitud de onda de la luz retornada es la misma que la del haz de salida del láser. Pero si las longitudes de onda difieren, el VLD calcula la velocidad con la que el tímpano se mueve y, a partir de ella, la extensión en que se mueve: hasta una milmillonésima de metro.

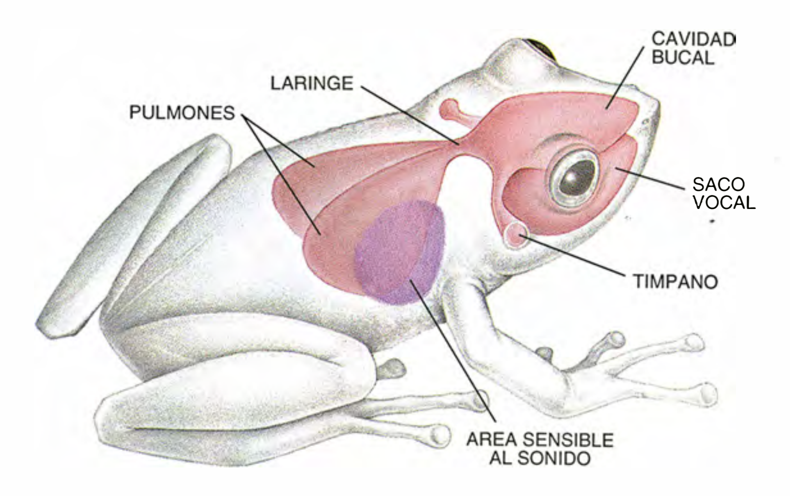
Instalamos 10 acuarios separados y completos para los machos traídos, con plantas tropicales y temperatura y humedad elevadas que recrearan su hogar. Con gran disgusto por nuestra parte, ni uno solo cantó durante las tres semanas que estuve allí. Nos concentramos en la medida del desplazamiento de su tímpano en respuesta a la reproducción del canto de un coqui, ajustado de suerte tal que los niveles de las notas *co* y *qui* en el tímpano fueran de 66 y 73 dB NPS, como corresponderían al canto de un vecino en la naturaleza.

El azar nos deparó una observación muy interesante. El protocolo experimental implicaba un plan de doble seguridad en el que yo dirigía el láser al tímpano y presentaba el canto, 130 veces, mientras Ehret y Tautz vigilaban la respuesta del tímpano. Realizábamos luego una prueba de control, en la que yo dirigía el láser a un punto del cráneo mientras se volvía a emitir el canto; queríamos así asegurarnos de que no era la rana entera lo que vibraba en respuesta al sonido. (Habíamos ya descubierto que si enfocábamos el haz del láser hacia la rana con el laboratorio a oscuras, permanecía inmóvil.) Restábamos los espectros de control de los espectros experimentales para obtener el movimiento neto del tímpano.

Cierta noche, y en una prueba de control, mi mano resbaló y apunté el láser hacia un costado de la rana. Para nuestra sorpresa, el VLD reveló que la piel que revestía los pulmones vibraba en respuesta al sonido. Procedimos de inmediato a "cartografiar" el cuerpo de la rana. Resultó que una pequeña región de la pared lateral del cuerpo respondía al sonido, y que era sólo ligeramente menos sensible que el tímpano.

Medimos las variaciones de presión que se producen en el interior de la cavidad bucal cuando se emite sonido con un pequeño altavoz aplicado a la pared lateral del cuerpo. Demostramos, con Barbara Schmitz, que estos sonidos hacían vibrar el tímpano. De estos trabajos se infería la existencia de una conexión aérea continua desde el pulmón al tímpano. Una tal ruta interna no sólo sugiere de qué modo las ranas localizan el origen de un sonido, sino también cómo se protegen de sus propios cantos.

Nuestros propios oídos, igual que los de los demás mamíferos y las aves, son receptores de presión: el sonido procedente del exterior excita el tímpano, mientras que el interior permanece a presión constante. Un receptor de este tipo no puede distinguir entre direcciones. (Sin embargo, a frecuencias bastante altas, la longitud de las ondas se acorta lo



3. CANALES AEREOS que conectan los pulmones de un coqui con sus oídos. Los descubrió el autor por azar, al realizar mediciones con láser de la pared del cuerpo de la rana. El haz de láser de helio-neón reveló que parte de la piel vibra en respuesta al sonido, comunicando el movimiento a los pulmones e indirectamente al tímpano. Además de permitir a la rana oír a través de sus costados (*área púrpura*), los canales de aire internos (*rosa*) pueden ayudar a proteger los oídos del daño producido por la intensidad del propio canto. El sonido, tras emitirse por el saco vocal, alcanza el tímpano por rutas internas y desde el exterior, de manera que sus efectos sobre el tímpano se compensan en gran parte.

suficiente para que pueda bloquearlas la cabeza, lo que permite cierta direccionalidad.) Por lo general, el origen de un sonido se identifica mediante el análisis del tiempo de llegada y de las diferencias de intensidad entre los dos oídos.

En un oído receptor de gradiente de presión, pensemos en el de muchos insectos, el sonido alcanza ambos lados del tímpano, que reacciona en función de la diferencia de presión a través del mismo. Este tipo de oído es intrínsecamente direccional, porque la presión (o fase) que el sonido presenta en cada lado depende de cuánto más deba desplazarse para llegar a un lado que para el otro. La longitud de las rutas, a su vez, depende del ángulo de incidencia del sonido. La comparación entre los dos oídos refuerza la direccionalidad.

Las ranas poseen una disposición intermedia entre el hombre y los insectos. Sus oídos son receptores asimétricos de gradientes de presión: el sonido impacta en ambas caras del tímpano, aunque con presiones desiguales, y se mide la diferencia entre ellas. Este receptor también es direccional, pero más complejo que el oído de los insectos. En la superficie interna, el sonido llega al menos por dos rutas: a través del oído opuesto y a través de la ruta acústica desde los pulmones.

Las rutas aéreas sugieren un nuevo recurso con el que protegerse de la hiperestimulación. Cuando un macho canta, la elevada presión de aire en su cavidad bucal se comunica al tímpano, que se pandea. Puesto que esta membrana se pone muy tirante, la respuesta al sonido se amortigua. Además, los sonidos generados por las cuerdas vocales chocan contra la superficie interior del tímpano y contra la superficie exterior, tras su emisión desde el saco vocal. Si los sonidos llegan aproximadamente en fase (de suerte que los períodos de presión elevada coincidan en ambos lados), el tímpano no se desplazará mucho en respuesta.

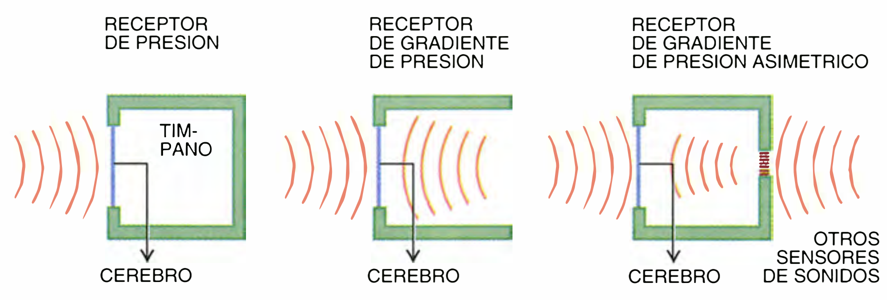
Para respaldar esta elaboración teórica con la observación del movimiento del tímpano, teníamos que volver a El Verde. Pamela López y yo empleamos un VLD portátil para efectuar las mediciones. Puesto que el blanco ha de ser extremadamente estable, nos vimos limitados a estudiar sólo aquellos individuos que cantaban desde objetos sólidos (troncos de árboles o casas). Más problemático resultaba trabajar en las condiciones de humedad bajo las que el coqui emite su canto más vigoroso: una humedad próxima al 100 por cien, vale decir, durante la lluvia o recién caída. Pero el VLD no funciona bajo la lluvia, porque no debe interrumpirse el haz de láser en su camino hacia el blanco, ni desde éste.

Aquel verano fue uno de los más secos de Puerto Rico. Para inducir a las ranas a cantar, descubrimos que el rociarles con agua durante unos minutos nos sacaba del apuro. Había otro problema: el láser requería una fuente de energía de 110 volt. Por suerte, los lugareños nos permitieron conectar nuestro cable de extensión para realizar las mediciones con láser del tímpano de la rana.

Nuestros resultados confirmaron que el tímpano vibra, efectivamente, en respuesta al propio canto del macho, pero con una amplitud de vibración muy pequeña. Ahora estamos investigando en qué fases el sonido llega a las caras interna y externa del tímpano para terminar de comprobar la teoría.

Algunas especies, incapaces de competir con el coqui y otras en volumen, agudeza o persistencia del sonido, sacan partido de unos medios completamente distintos. Una de ellas es la rana de labios blancos, *Leptodactylus albilabris*, un animal terrícola y nocturno que se encuentra en ciénagas, acequias y arroyos de montaña en gran parte de Puerto Rico. Los machos cantan desde el interior de matas de hierba densa, bajo vegetación caída o desde depresiones someras o madrigueras en el suelo fangoso. (Las hembras de la especie están camufladas y son silenciosas.)

La noche en que oí por primera



4. TRES TIPOS DE OIDOS predominan en el reino animal. En el receptor de presión (*izquierda*), común en aves y mamíferos, el tímpano responde a las variaciones de presión que inciden desde el exterior, mientras que el interior permanece a temperatura constante. Un oído único no puede distinguir la dirección. En el receptor de gradiente de presión (*centro*) de muchos insectos, el sonido alcanza ambas caras del tímpano, que responde a la diferencia de presión a su través. Un oído solo puede detectar el origen de un sonido. En el receptor de gradiente de presión asimétrico (*derecha*), que se encuentra en las ranas, el sonido hace impacto en ambos lados del tímpano, pero con presiones desiguales. Este oído es también direccional.

vez una rana de labios blancos, me acerqué cautelosamente a ella, pero dejó de cantar al instante. En el laboratorio de Edwin R. Lewis, de Berkeley, investigamos la extraordinaria sensibilidad de la rana a mis pasos distantes. Transmitidas a través del suelo, las pisadas debieron hacer que la rana temblara. Pero, ¿cómo consiguió el animal detectar vibraciones tan imperceptibles?

Descubrimos una población de fibras nerviosas que se originan en el oído interno que respondían vigorosamente cuando el animal se sometía a vibraciones de frecuencias de entre 20 y 160 hertz. Las fibras más sensibles respondían a aceleraciones máximas de 0,000001 g (siendo $g = 980{,}6$ centímetros por segundo al cuadrado, la aceleración causada por la gravedad), lo que las hace 100 veces más sensibles que los órganos del oído interno de los mamíferos.

Se sabe que la sensibilidad a la vibración de ranas y sapos reside en el sáculo del oído interno. En la rana de labios blancos, este órgano está constituido por un saco lleno de una lechada de densos cristales de carbonato cálcico, que reposan sobre 600 células ciliadas sensoriales. Cuando el animal tiembla, la superficie superior de las células ciliadas y las raíces de los pelos se mueven en vaivén, pero el saco, enorme, permanece estacionario debido a la inercia. En consecuencia, los cilios se comban, modulando la tasa de descarga normal de las fibras nerviosas.

Pero un sismómetro tan sensible como el de la rana de labios blancos no debe estar ahí sólo para detectar la presencia de investigadores. ¿Cuál era su función? Lewis y yo utilizamos un geófono, un aparato que consta de una bobina sostenida por un muelle en el interior de un intenso campo magnético; los movimientos verticales de la tierra generan un voltaje en la bobina. Conectamos amplificadores y auriculares y colocamos el geófono cerca de una rana cantora; el animal registraba un fuerte golpeteo simultáneo al canto.

Después de un chubasco, el macho entierra su extremo posterior en el suelo fangoso, dejando al descubierto la cabeza y miembros anteriores. Cuando croa, su bolsa vocal se expande de forma explosiva, golpeando el suelo. El impacto genera una onda de Rayleigh de vibraciones verticales que viaja a lo largo de la superficie del suelo a unos 100 metros por segundo (y con un máximo de aceleración de 0,002 g a una distancia de un metro). La energía de esta onda contiene frecuencias en el mismo rango en el que encontramos que las fibras nerviosas eran más sensibles.

Para comprobar si los golpes eran detectados por las ranas de labios blancos vecinas, Lewis y sus colegas construyeron un "golpeador" a partir del solenoide de una máquina de escribir eléctrica. Disparamos el mecanismo con un registro sonoro del canto de una rana, simulando así el ritmo y la pauta de golpeteo del animal. Aun cuando aislamos el golpeador para que no pudieran oírse a través del aire los sonidos que emitía, los machos situados a una distancia de tres metros de nuestra rana artificial acompasaban sus cantos a los de ésta, produciendo un coro.



5. MACHO DE RANA de labios blancos de Puerto Rico. No sólo canta, sino que transmite vibraciones a través del suelo fangoso. Los machos próximos producen sus golpeteos a continuación de los demás, lo que genera un coro.

No sabemos si los machos responden de otro modo a los componentes acústico y sísmico del canto de un vecino. Aunque las vibraciones suelen asociarse con movimientos del cuerpo, y el sonido con cambios de la presión aérea que inciden en los oídos, la percepción de estos estímulos parece estar íntimamente relacionada. Estudios recientes de ranas leopardo han revelado la existencia de dos poblaciones importantes de fibras nerviosas. Un conjunto se origina en la papila anfibia, un sensor de sonidos de baja frecuencia, y el otro conjunto en el sáculo, con sus células ciliadas sensibles a la vibración. Pero ambos haces de fibras responden tanto al sonido como a las vibraciones. La principal diferencia entre sonido y vibración en este caso pudiera muy bien estribar en la ruta que estos estímulos toman para alcanzar los sensores. Queda mucho por conocer sobre tales rutas.

No sólo la rana de labios blancos. También se comunican sísmicamente la rata topo ciega de Israel (*Spalax*), la rata topo de El Cabo (*Georychus*) y la rata canguro de cola en estandarte del sudoeste de los Estados Unidos (*Dipodomys*). Recientemente, Albert S. Feng, Jakob Christensen-Dalsgaard y el autor descubrieron que una especie de rana arborícola malaya (*Polypedates leucomystax*) exhibe un comportamiento insólito. Durante el cortejo, las hembras, que viven en densas marañas de vegetación flotante, se cuelgan de un carrizo u hoja de hierba y lo golpetean rítmicamente con sus dedos traseros. Esta actividad se produce en la oscuridad, dura varios minutos y sólo ocasionalmente está acompañada de cantos. Los machos de los carrizos próximos localizan en seguida a la hembra golpeteadora, y se aparean con ella.

Los golpeteos parecen servir como señales vibracionales que indican la presencia de la hembra. Este comportamiento es notable: en la mayoría de las especies de ranas arborícolas, los machos están quietos y cantan, y las hembras los localizan. Asimismo, ésta es la primera vez que se ha encontrado que un vertebrado terrestre transmite señales sísmicas a través de un sustrato distinto del suelo. Probablemente, los distintos ambientes en los que viven las ranas ofrecen otros medios para su explotación. Espero pasar muchos más años descifrando estas diversas señales.

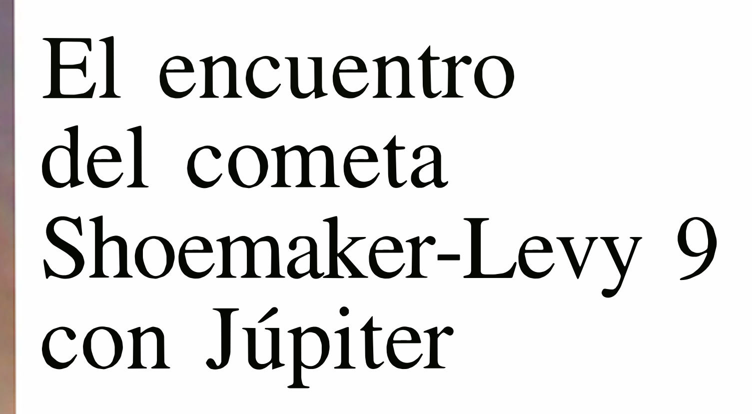
BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BIOLOGICAL CONSTRAINTS ON ANURAN ACOUSTIC COMMUNICATION: AUDITORY CAPABILITIES OF NATURALLY BEHAVING ANIMALS. P. M. Narins en *Evolutionary Biology of Hearing*. Dirigido por D. B. Webster, R. R. Fay y A. N. Popper. Springer-Verlag, 1992.

REDUCTION OF TYMPANIC MEMBRANE DISPLACEMENT DURING VOCALIZATION OF THE ARBOREAL FROG, *Eleutherodactylus coqui*. P. M. Narins en *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 91, n.º 6, páginas 3551-3557; junio 1992.

COMPARATIVE ASPECTS OF INTERACTIVE COMMUNICATION. P. M. Narins en *Active Hearing*. Dirigido por A. Flock, D. Ottosen y M. Ulfendahl. Elsevier Science, 1995.





El encuentro del cometa Shoemaker-Levy 9 con Júpiter

Las imágenes del cometa que se rompió en pedazos y se precipitó sobre Júpiter siguen asombrando a los astrónomos un año después

David H. Levy, Eugene M. Shoemaker y Carolyn S. Shoemaker

Trabajábamos bajo la cúpula del pequeño telescopio Schmidt del observatorio de Palomar, en una habitación abarrotada de papeles y libros. Era el 22 de mayo de 1993. Carolyn se hallaba inclinada sobre su estereomicroscopio, un instrumento que le ha servido para examinar las fotografías de asteroides y cometas durante más de diez años.

Gene ha dedicado una parte importante de su carrera a observarlos. En los años cincuenta demostró ya que el choque de un pequeño asteroide formó la enorme hoya que hay en el desierto de Arizona al este de Flagstaff. Más tarde se dedicó a investigar los cráteres visibles de la Luna y de los satélites de los planetas exteriores, así como los restos de viejas colisiones que todavía se dejan ver en las soledades de Australia. Gene y Carolyn están ahora empeñados en la búsqueda sistemática de asteroides susceptibles de colisionar con la Tierra.

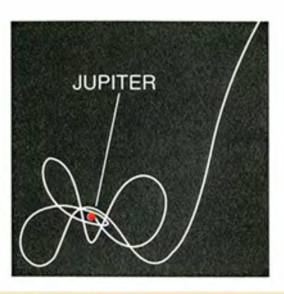
Aquel día de mayo, David leía su correo electrónico para comprobar si debía añadir al programa de observación algún cometa o asteroide recién detectado. Cuenta en su haber con 21 trofeos obtenidos en la caza de cometas, ocho de ellos por descubrimientos realizados con un telescopio de 40 centímetros en el patio trasero de su casa. Desde 1989, en que venimos trabajando en equipo, hemos divisado 13 cometas. Pese al nivel de experiencia adquirido, el descubrimiento de mayo de 1993 nos sobrevino por sorpresa, lo mismo que al resto de la comunidad astronómica.

El correo electrónico de David traía una información sorprendente, procedente de la oficina central de telegramas astronómicos de la Unión Astronómica Internacional (una especie de servicio telegráfico especializado). El cometa que habíamos descubierto hacía dos meses colisionaría con Júpiter en julio de 1994. Tras toda una vida profesional examinando los cráteres formados por los impactos cometarios y los cuerpos que los

1. EL SHOEMAKER-LEVY 9 apareció inicialmente en forma de cometa aplanado, con alas a cada lado. Imágenes más precisas revelaron que estaba constituido por una sucesión de núcleos separados. Estos fragmentos chocaron contra Júpiter sólo 16 meses después de su descubrimiento, y cada uno dejó tras de sí una enorme mancha oscura, de aspecto peculiar, sobre el planeta.

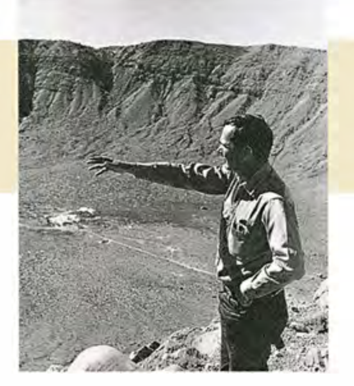
Crónicas cometarias

La colisión de un cometa de gran tamaño con un planeta es un evento excepcional. Los astrónomos reconocen la suerte que supuso que el impacto de Shoemaker-Levy 9 con Júpiter tuviera lugar en 1994 y no antes. La conjunción de fenómenos astronómicos y elaboración teórica llevó a determinar que S-L 9 chocaría contra Júpiter, lo que permitió prepararse para presenciar los fuegos artificiales del fin del cometa con un detalle sin precedentes, gracias al *Telescopio Espacial Hubble*. A continuación se destacan los hechos principales.



1929: Por esta época, un cometa de corto período entra en una órbita polar inestable alrededor de Júpiter.

1956: Eugene Shoemaker termina su investigación doctoral acerca de cómo, hace 50.000 años, un asteroide diminuto abrió un enorme cráter en el desierto de Arizona.





1960: David Levy adquiere su primer telescopio, un reflector de 9 centímetros. Como un curioso presagio de su futuro logro, el primer objeto astronómico que observó fue Júpiter.

ocasionan, Gene podría contemplar una colisión en directo.

Como sabe todo aficionado que se haya asomado a la Luna desde su telescopio, la superficie del satélite está sembrada de cráteres de impacto. La propia Luna se originó verosímilmente a partir de los restos de una colisión. Durante la juventud de nuestro planeta, un cuerpo del tamaño de Marte pudo chocar con él, derretirlo y poner en órbita un torrente de "escombros", que al congelarse crearía la Luna. Tectónicamente estática, sin aire ni agua, la Luna conservará indefinidamente su faz marcada por cráteres. La erosión y la deposición sedimentaria nivelan sin cesar la superficie de la Tierra, razón que explica la relativa ausencia de cráteres, pese a haber recibido nuestro planeta muchos más impactos que la Luna. Una auténtica ducha cometaria llovió sobre la Tierra en formación, hace unos 3900 o 4500 millones de años, aportando carbono, hidrógeno, nitrógeno y oxígeno, elementos críticos que permitieron el desarrollo de la vida.

Pero colisiones de ese tipo han arrasado también el mundo de la vida. Hace 65 millones de años, un objeto algo mayor que el cometa Halley se precipitó contra lo que ahora es la costa de la península de Yucatán. El impacto generó un cráter de 170 kilómetros de ancho cuyos restos salieron despedidos por todo el planeta. Cuando el número ingente de misiles balísticos cayó de nuevo a tierra, el cielo se cubrió de meteoros y la atmósfera alcanzó temperaturas altísimas. Casi por doquier, la superficie ardió en llamas, pero el infierno duraría poco. Una oscuridad persistente envolvió la Tierra a medida que el polvo ascendía a la atmósfera e impedía el paso a los rayos solares. Tras meses de frío, vinieron siglos de calor debido al efecto invernadero que causó el dióxido de carbono liberado durante el impacto por las rocas que lo sufrieron. Se extinguieron numerosas especies.

Este cataclismo ocurrido en un ayer remoto nos indica que los proyectiles procedentes del espacio pueden transformar nuestro planeta. El programa de investigación que llevamos a cabo en Palomar se inscribe entre los varios concebidos para determinar con qué frecuencia chocan los intrusos interplanetarios de este tipo contra los planetas y los satélites. Pero lo que nunca hubiéramos imaginado era asistir a un impacto tan colosal.

Nuestro descubrimiento del cometa empezó con la normalidad acostumbrada. La del 23 de marzo de 1993 fue una noche oscura, que amenazaba tormenta. Realizamos nuestras tareas habituales en el menor de los cuatro telescopios del observatorio de Palomar: un instrumento provisto de un espejo de 66 centímetros y una lente correctora de 48 diseñado para rastrear zonas muy amplias del cielo. Durante las observaciones nos acompañaba esa vez Phillipe Bendjoya, un astrónomo de la Universidad de Niza que estaba de paso.

Las nubes iban poco a poco cubriendo el cielo, y aunque la bruma no ocultaba por completo el firmamento, sabíamos que oscurecería las estrellas más débiles, los asteroides y los cometas si hubiera. Decidimos interrumpir el procedimiento rutinario de observación y optamos por utilizar un carrete que había estado expuesto parcialmente a la luz (las pésimas condiciones meteorológicas parecían merecer que se usara esa película dudosa). Uno de nuestros campos de visión habituales abarcaba el planeta Júpiter, que estaba en uno de los claros. Hicimos tres exposiciones —una de Júpiter y dos de zonas vecinas— antes de que las nubes cerraran el hueco que quedaba libre. Algunas horas después se aclaró la noche y pudimos realizar una segunda exposición del campo de Júpiter.

Dos días más tarde, Carolyn examinaba las imágenes tomadas aquella noche encapotada. Por medio de su estereomicroscopio, se dedicó a buscar el efecto tridimensional que produce el pequeño cambio de posición de un asteroide o cometa con respecto a las estrellas de fondo. De pronto se irguió y dijo: "No sé lo que estoy viendo, pero parece un cometa espachurrado." Era cierto. El objeto se asemejaba a un cometa al que hubiesen pisado. Los cometas presentan un núcleo de varios kilómetros de diámetro, formado de hielo, rocas y compuestos orgánicos. Cuando se acerca al Sol, el hielo pasa directamente del estado sólido al gaseoso y libera polvo, que genera un halo luminoso, la coma. La presión de la radiación solar ahorma ese material en una cola alargada. Pero aquel cometa, en vez de una sola coma y una única cola, presentaba una aglomeración de comas en forma de barra, con una cola compuesta que se estiraba hacia el norte. Y aún más extraño: a cada extremo de la barra se detectaba una línea muy delgada de luz.

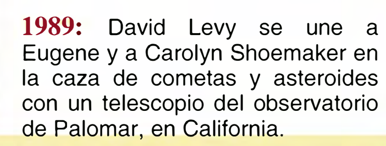
Necesitábamos confirmar ese ex-

1982: Carolyn Shoemaker se une a su marido en la búsqueda de cometas y asteroides. Se sirven de un estereomicroscopio construido para comparar dos imágenes de una misma parte del cielo tomadas en momentos distintos.





1986: El *Challenger* explota durante su despegue, lo que deja en tierra la flota de transbordadores espaciales y retrasa el lanzamiento del *Telescopio Espacial Hubble* y de la sonda *Galileo*.



1989: David Levy se une a Eugene y a Carolyn Shoemaker en la caza de cometas y asteroides con un telescopio del observatorio de Palomar, en California.





1990: El transbordador espacial *Discovery* pone en órbita el *Hubble*, pero una larga serie de problemas técnicos y los defectos del espejo principal afectan gravemente al telescopio.

traño hallazgo con un telescopio mejor. Nos pusimos en contacto con James V. Scotti, quien esa noche realizaba observaciones con el telescopio *Spacewatch* de Kitt Peak. Jim se prestó a tomar imágenes de televisión de alta resolución del cometa. Quedó estupefacto: "Hay al menos cinco núcleos cometarios en fila", nos explicaba por teléfono al describirnos lo que se veía, "pero existe material del cometa en los huecos que los separan. Sospecho que veré más núcleos cuando aclare la noche."

Inmediatamente dimos cuenta de este estrafalario cometa a Brian G. Marsden, director de la oficina central de telegramas astronómicos del Centro de Astrofísica Smithsoniano de Harvard, y Scotti siguió con las observaciones. Al día siguiente, la oficina de Marsden anunció el descubrimiento. La descripción del objeto era tan insólita que los astrónomos de todo el mundo se pusieron enseguida a examinarlo. Jane Luu y David Jewitt obtuvieron una imagen magnífica con el reflector de 2,20 metros de la Universidad de Hawai. Más tarde identificaron 21 núcleos separados que, según sus propias palabras, se alineaban "como perlas en un collar".

Siguiendo la tradición inaugurada por Charles Messier, hace más de dos siglos, el cometa fue bautizado con el nombre de sus descubridores. Debido a que era el noveno de una serie de cometas que habíamos encontrado y que describían alrededor del Sol órbitas de corto período, se le otorgó el título formal de "Cometa Periódico Shoemaker-Levy 9". Para abreviar, S-L 9.

A mediados de abril de 1993, Marsden, Syuichi Nakano y Donald K. Yeomans determinaron que el cometa orbitaba alrededor de Júpiter. También hallaron que había pasado muy cerca del planeta unos ocho meses antes de que lo localizáramos. Esa proximidad explicaría la existencia de múltiples fragmentos.

El 7 de julio de 1992, S-L 9 se había acercado a unos 20.000 kilómetros de las capas nubosas de Júpiter. Al realizar una curva en horquilla alrededor del planeta gigante, se hizo añicos debido a que los fragmentos más cercanos a Júpiter sufrieron una desviación más pronunciada que los más alejados. La diferencia en las trayectorias orbitales se justificaba por la disminución de la fuerza de la atracción gravitatoria de Júpiter del extremo más cercano del cometa al más alejado. La tensión que experimentó S-L 9 era sumamente débil, pero aun así logró despedazarlo con facilidad. Este comportamiento sugiere que el cuerpo original era simplemente una pila de fragmentos adheridos entre sí por su débil atracción gravitatoria.

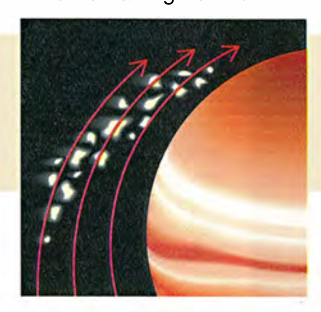
Aunque los astrónomos ya habían establecido que, en el pasado, había habido por breves períodos cometas en órbita alrededor de Júpiter, S-L 9 es el primero observado dando vueltas alrededor de un planeta. Júpiter no tenía una, sino 21 pequeñas lunas nuevas, pero esos satélites recién adquiridos no habrían de durar mucho. Tras los cálculos pertinentes, Marsden anunció que el resquebrajado cometa chocaría contra Júpiter en julio de 1994.

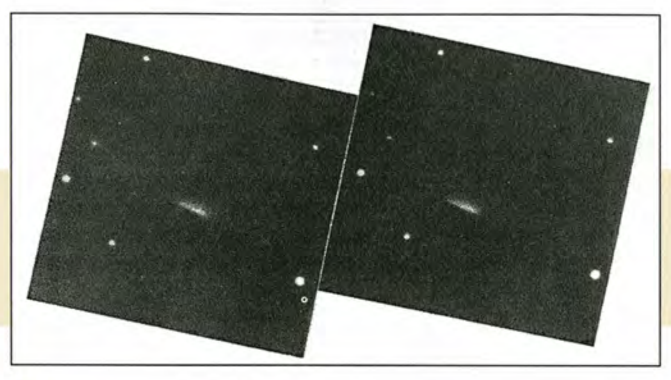
Astrónomos y astrofísicos se preguntaron inmediatamente por las consecuencias de los impactos. ¿Verían una inmensa exhibición pirotécnica o sería un fiasco cósmico? H. Jay Melosh sugirió que los cometas se adentrarían tanto en la atmósfera de Júpiter antes de estallar, que el planeta se los tragaría sin que dejasen apenas rastro. Por contra, Thomas J. Ahrens, Toshiko Takata, Kevin Zahnle y Mordecai-Mark Mac Low opinaron que cada núcleo excavaría un "túnel de fuego" en la atmósfera de Júpiter, explotaría y liberaría al espacio una espectacular bola encendida a través de esa cavidad. David A. Crawford y Mark B. Boslough sostenían que se produciría una tremenda erupción de gas caliente, sobre todo en la parte superior del túnel.

Aun cuando fueran ciertos la mayoría de los pronósticos, ¿nos sería dado presenciar parte al menos del espectáculo? Para responder al interrogante hacía falta determinar en qué punto exacto del planeta se produciría el impacto. Los primeros cálculos no resultaban alentadores: predecían que los cometas chocarían en la cara nocturna de Júpiter, donde el cuerpo del planeta impediría la visión desde la Tierra. Júpiter tendría que rotar en

DAVID H. LEVY, EUGENE M. SHOEMAKER y CAROLYN S. SHOEMAKER se aunaron en 1989 para realizar, desde entonces, observaciones astronómicas conjuntas. Levy ha escrito 15 libros, una cifra algo menor que el número de cometas que ha descubierto. Eugene y Carolyn Shoemaker, marido y mujer, trabajan en equipo desde 1982. Eugene ha organizado la rama de astrogeología del Servicio Geológico de los EE.UU. Carolyn enseña astronomía en la Universidad del Norte de Arizona.

1992: Mientras describe una órbita elíptica, el cometa Shoemaker-Levy 9 pasa a menos de 20.000 km de Júpiter, se desintegra por los efectos de la gravedad del planeta y se forma un torrente de fragmentos.





1993: En un par de fotografías telescópicas que cubren una zona del cielo cercana a Júpiter, Carolyn Shoemaker descubre lo que parece un "cometa espachurrado". El efecto tridimensional se aprecia sosteniendo la página muy cerca y mezclando las dos imágenes.

1993: Los astronautas del trans-bordador espacial *Endeavor* reparan en órbita, a unos 600 kilómetros de la Tierra, un *Hubble* con problemas.



dirección este al menos una hora para que las colisiones pudieran observarse desde la Tierra. La naturaleza estaba a punto de poner en escena el choque más grandioso de la historia y nuestra butaca quedaba detrás de la columna.

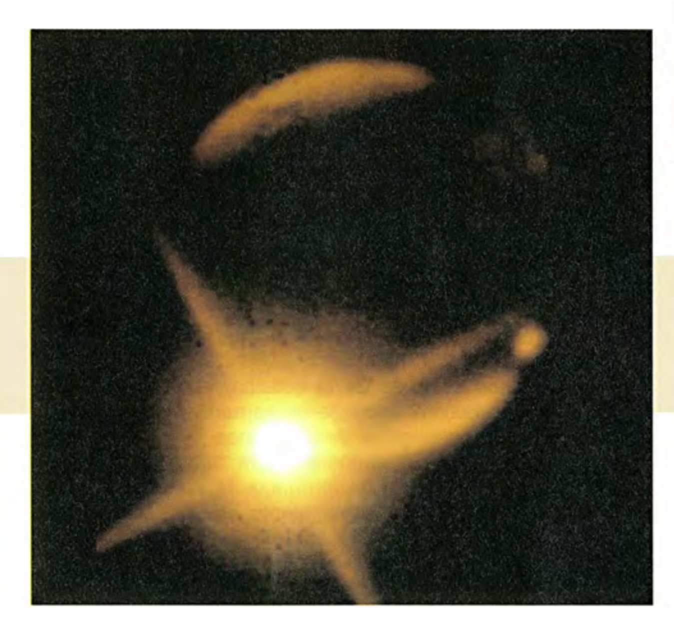
Durante el verano y el otoño de 1993 aceptamos este pronóstico; Júpiter y el Sol estaban demasiado próximos en el cielo como para que pudieran realizarse más observaciones del S-L 9. Pero a principios de diciembre Scotti obtuvo, al salir Júpiter justo antes del amanecer, nuevas posiciones de los fragmentos del cometa. A partir de estas medidas se llegó a una conclusión diferente: el impacto de los cometas se produciría mucho más cerca de la cara visible desde la Tierra.

Conforme se acercaba la "semana del impacto", en el verano de 1994, se hizo evidente que el carácter único del fenómeno justificaba la dedicación de tiempo de observación por parte del mayor número de telescopios posible. Resultaba asimismo ocasión excepcional el que los astrónomos contaran con 14 meses de antelación para coordinar los programas. El *Telescopio Espacial Hubble* encabezaba la lista de potentes telescopios que habrían de dirigir su mirada a Júpiter. Con su óptica corregida, el telescopio ya había registrado imágenes de los núcleos del cometa con una claridad impresionante. El equipo dirigido por Harold A. Weaver, del Instituto de Ciencia del *Telescopio Espacial* en Baltimore, utilizaría la cámara planetaria de campo ancho del *Hubble* para hacer un seguimiento de los núcleos del cometa en su aproximación a Júpiter. Un grupo encabezado por Heidi B. Hammel, del Instituto de Tecnología de California, dedicaría el telescopio a la obtención de imágenes detalladas de todo el planeta el día antes del primer impacto, a fin de compararlas con las que se irían tomando durante la semana. El telescopio también recogería las líneas espectrográficas características de los elementos y gases liberados durante las explosiones, siempre y cuando, claro está, se pudiera ver algo en el momento en que las zonas de los impactos entrasen en el campo de visión de la Tierra.

Pero aunque las colisiones que tendrían lugar en la parte oscura de Júpiter fuesen invisibles desde la Tierra, existiría otro medio para examinarlas. En su trayectoria hacia su encuentro con Júpiter, la sonda espacial *Galileo* estaba en una posición idónea para que las cámaras y otros instrumentos instalados a bordo dispusieran de una visibilidad excelente de los lugares de los impactos. Los controladores del Laboratorio de Propulsión a Chorro de Pasadena dieron instrucciones a la *Galileo* para que recogiera datos de varios de los impactos y los enviara a la Tierra.

Importantes telescopios dispersos por el mundo intervendrían en la detección de los impactos y se ocuparían de los fenómenos con ellos asociados. Las colisiones tendrían lugar







1994: En seis días, los 21 fragmentos del cometa se estrellan contra Júpiter y explotan. En determinadas longitudes de onda de la luz, algunos de los penachos surgidos alcanzan un brillo tan deslumbrante, que impiden la visión del planeta (*izquierda*). Al rotar éste, las cicatrices de las colisiones producidas en la parte oscura de Júpiter se hacen visibles desde la Tierra (*arriba*).

1994: Los astrónomos del Instituto de Ciencia del *Telescopio Espacial* reciben imágenes enviadas por el *Hubble* de los gigantescos penachos explosivos y de las manchas producidas en Júpiter. Comienza el proceso de descifrar los datos.

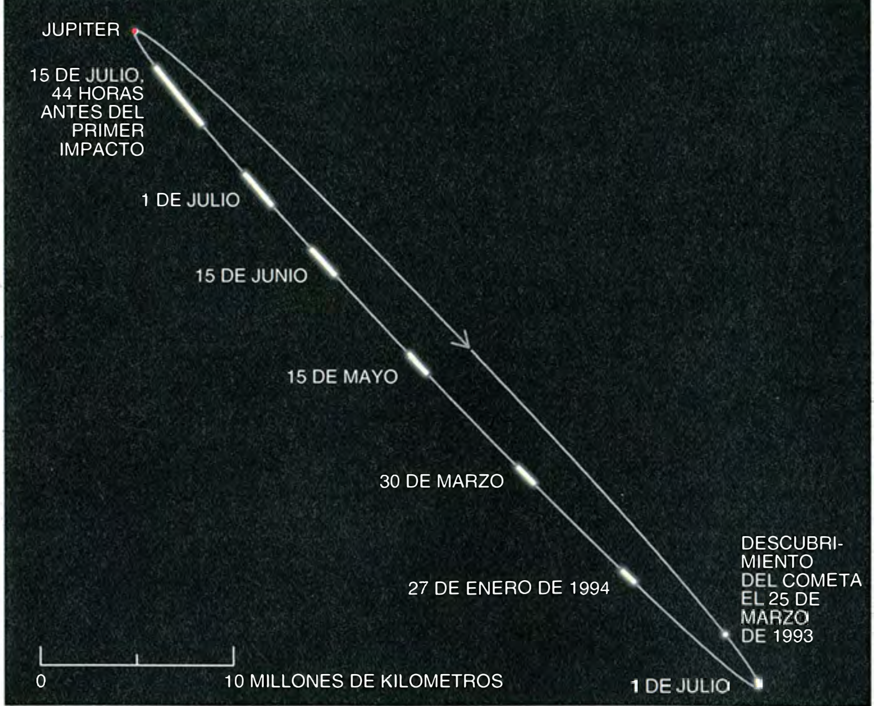


a lo largo de un período de seis días, por lo que se necesitaban telescopios emplazados por todo el globo. Participaron el telescopio de 5 metros de Palomar, otros telescopios de gran diámetro emplazados en España, Chile, Hawai y Australia, y un conjunto de telescopios menores. El *Observatorio Aerotransportado Kuiper* de la NASA, en vuelo desde Melbourne, tomó unas medidas espectroscópicas fundamentales. Además, varios equipos de radioastrónomos realizaron un seguimiento de Júpiter para determinar los efectos de los choques sobre la magnetosfera joviana.

Imke de Pater y sus colegas planearon la toma de imágenes infrarrojas en las longitudes de onda de la luz absorbida por el gas metano frío, con el telescopio de 10 metros del observatorio Keck. Debido a que la atmósfera de Júpiter, rica en metano, absorbe esas longitudes de onda, los filtros que sólo dejaran pasar la luz en la "banda del metano" tendrían el efecto de oscurecer la cara del planeta y resaltar cualquier fenómeno que se desarrollara a gran altura dentro de la atmósfera del planeta o allende la misma. Para el grupo de Imke, la sensibilidad de tales mediciones permitiría registrar cualquier mancha o resto que produjesen los impactos y quizás incluso los penachos que emitiesen. Se preparó el Telescopio Explorador Infrarrojo del Polo Sur (SPIREX) para que realizara observaciones similares.

Tras la espera de 14 meses, el primer mensaje fue electrizante: el observatorio español de Calar Alto había recogido la señal infrarroja característica de un penacho que se





2. LOS FRAGMENTOS DEL COMETA que subsistieron tras el acercamiento a Júpiter de 1992 muestran sus delicadas comas en una imagen tomada por el *Telescopio Espacial Hubble* (*izquierda*). Los 21 núcleos se identifican con las letras del alfabeto (se han omitido la I y la O para evitar confusiones con los números 1 y 0). Los subíndices numéricos de los fragmentos P y Q denotan núcleos que se desprendieron después de la desintegración principal. La longitud del chorro de fragmentos fue aumentando desde el momento del descubrimiento hasta el de la colisión definitiva (*abajo*).

Diario de una perla lanzada al aire

Quedé fascinado ante la semejanza mostrada por las colisiones más intensas y las secuencias de sucesos que las rodearon. Antes del impacto, penetraba en la atmósfera de Júpiter una tormenta de pequeñas partículas. Este torrente de residuos originaba la incandescencia infrarroja sobre el borde visible del planeta, encima del lugar del impacto, que se observaba desde la Tierra. A continuación, la parte principal de la masa chocaba contra Júpiter con toda su fuerza y generaba un brillante meteoro, oculto para el *Hubble* y los telescopios terrestres, pero no para la sonda *Galileo* (*abajo*), que captó la imagen del choque del núcleo W (*izquierda*).

A medida que el núcleo se adentraba en la atmósfera de Júpiter, emergía una bola incandescente. Del "túnel de fuego" salían disparados gases calientes a velocidades superiores a los 10 kilómetros por segundo. Este chorro producía un penacho que alcanzaba los 3000 kilómetros de altura por encima de las nubes de amoniaco del planeta. A medida que crecía el penacho, descendía su temperatura hasta quedar reducida a unas decenas de grados sobre el cero absoluto. Se condensaban entonces las partículas submicroscópicas, lo que hacía que, gracias a la luz solar reflejada, el penacho fuese perceptible según entraba en el campo de visión de la Tierra, alzándose sobre la sombra de Júpiter.

Unos seis minutos después de la colisión, el penacho que había brotado en dirección ascendente comenzaba a desplomarse. Su caída se prolongaba durante unos 10 minutos. El penacho en desplome y la atmósfera que había debajo se iban recalentando al par que se producía la compresión de los gases y la consiguiente emisión de destellos persistentes de energía infrarroja. Este estallido era el principal suceso brillante.

En colaboración con Paul J. Hassig y David J. Roddy he estudiado la física que gobierna los penachos mediante un modelo numérico por ordenador. Nuestro trabajo ayuda a explicar las oscuras nubes que se observan durante las dos horas siguientes al impacto. La simulación por ordenador (*derecha*) reproduce muchos de los rasgos de un penacho en su evolución, como los del núcleo G, captado por el *Hubble* (*derecha*).

En las imágenes del *Hubble* y en el modelo



***GRACIAS A LA GEOMETRIA** de la visión desde la sonda espacial* **Galileo** *en su camino hacia Júpiter, ésta pudo ofrecer una imagen directa de las colisiones.*

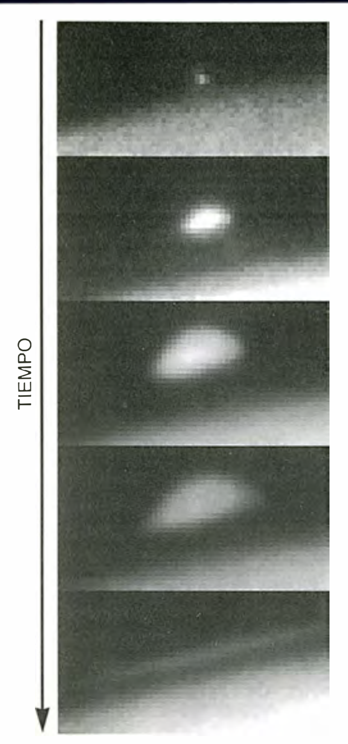
desvanecía, procedente del primer impacto (núcleo A). El Observatorio Europeo del Sur, en Chile, confirmó la detección. El impacto detectado era, además, espectacular. Como habríamos de descubrir muy pronto, el penacho se disparó a una altura de 3000 kilómetros por encima de las nubes de Júpiter. Pese a esta noticia, los astrónomos pendientes de los primeros datos del *Hubble* seguían presos de una gran tensión. El telescopio utilizó filtros y detectores diferentes de los empleados en Calar Alto, y todos se preguntaban qué es lo que vería el gran ojo del espacio.

En el Instituto de Ciencia del *Telescopio Espacial*, los especialistas en cometas se apiñaron, en cuanto empezaron a llegar las primeras imágenes, en torno a un solo monitor de vídeo. Las primeras no mostraban perturbación alguna, lo que contribuyó a aumentar la ansiedad, pero enseguida apareció una mancha sobre el borde del planeta y los presentes en la habitación respiraron. La siguiente imagen mostraba el penacho elevándose sobre Júpiter y ganando brillo. Los fuegos artificiales se veían nítidamente. Un grito de júbilo estalló en la sala.

Era evidente que la meticulosa planificación llevada a cabo obtenía generosa recompensa. El grupo internacional de observatorios, instalados en el suelo y en el espacio, respondía como una orquesta sinfónica cuyos directores eran los frecuentes mensajes electrónicos de Marsden; gracias a ellos, cada grupo de observadores supo en todo momento lo que hacían los demás, y así pudieron ir adaptando sus programas a las circunstancias cambiantes.

Desde el principio, los cometas mostraban un comportamiento desconcertante. Al ir rotando Júpiter apareció una gran mancha producida por el núcleo A; constaba de tres partes claramente diferenciadas: una franja central, un anillo en expansión y una nube externa en media luna. En la parte visible del espectro las manchas parecían oscurísimas, pero en la luz infrarroja de la banda de absorción del metano la mancha destacaba luminosa sobre el fondo del oscuro planeta. La mancha entera era tan grande como la Tierra. Horas más tarde, el núcleo B chocó contra Júpiter causando efectos muy distintos. Aunque B brillaba más que A, el penacho que surgió del impacto era diminuto y sólo pudo detectarlo con facilidad el telescopio de 10 metros de Keck. Puede que el núcleo B consistiera en un enjambre de pequeños subnúcleos, cada uno del tamaño de una casa, desprendidos del núcleo C algún tiempo después de la fragmentación inicial. Un observador situado en Júpiter habría presenciado una fabulosa tormenta de meteoros, pero desde la Tierra no se vio gran cosa.

Los núcleos C y E chocaron causando más o menos los mismos efectos que el núcleo A. Dos días más tarde la expectación crecía a medida que el núcleo G —con la coma brillante y presumiblemente mayor masa— realizaba su descenso final. El *Hubble* contaba con una vista despejada de Júpiter, pero los telescopios de gran diámetro de los observatorios de Mauna Kea estaban cerrados a causa de la neblina y la llovizna. Sin embargo, milagrosamente, un minuto antes del impacto, las nubes que envolvían el Mauna Kea se disiparon. Se abrieron las cúpulas de los telescopios, justo a tiempo para que pudieran captar imágenes del impacto antes de que la lluvia y la niebla obligasen a cerrarlos, diez minutos más tarde. Tuvieron suerte: el impacto del núcleo G liberó tal energía, que el brillo del penacho en su caída superó al de todo el planeta en la banda infrarroja del metano. El núcleo G dejó la misma huella que los impactos anteriores de los núcleos A, C y E, pero la cicatriz fue mucho mayor. El enorme fogonazo



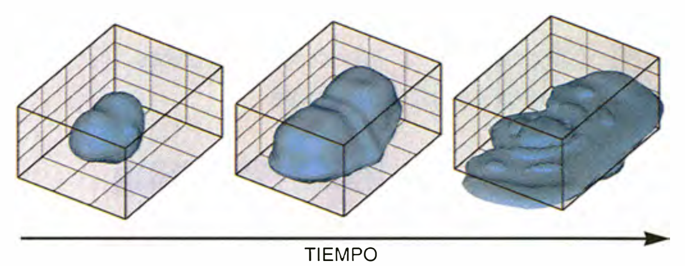
EL PENACHO en expansión del núcleo G, en una secuencia de imágenes del Hubble.

de ordenador se observa que, conforme se desplomaban los penachos principales sobre el planeta, en su base aparecía una especie de "falda" en media luna que se expandía lateralmente. Este rasgo era perceptiblemente asimétrico porque el material salía del inclinado "túnel de fuego" disparado en la dirección de "contrafuego". El flujo lateral continuaba unos 45 minutos por la parte superior de la atmósfera mientras el borde delantero del lóbulo recorría una distancia superior al radio de la Tierra.

Gran parte de la masa con que entraba el cometa terminaba repartida por la nube exterior con forma de media luna, junto con los gases impelidos por el choque procedentes de la parte superior del túnel excavado en la atmósfera de Júpiter. Las imágenes de la mancha producida por el núcleo G muestran 16 líneas radiales bien definidas que cortan la media luna y que podrían ser producto de los 16 fragmentos del núcleo.

Las secuelas de las colisiones mayores mostraban que las nubes oscuras formaban, además, una zona interna diferenciada. Esa mancha central marcaba la existencia de una columna muy alta que se extendía de la troposfera a la estratosfera de Júpiter. La zona oscura seguramente contenía componentes surgidos de las profundidades de la atmósfera del planeta, quizá de la capa de nubes de hidrosulfuro amónico que yace oculta bajo la capa superior de nubes de amoniaco. ¿Por qué se formaba una zona transparente entre la zona interior y la media luna? Lo ignoramos, igual que desconocemos la composición de las partículas oscuras gracias a las cuales las nubes del impacto fueron tan visibles.

Clifford N. Mathews propuso que la materia oscura era un polímero marrón denominado poli-HCN. En mi opinión, la materia oscura de las nubes interiores quizá contuviese compuestos de azufre, y las zonas transparentes podrían estar formadas por gases procedentes de las regiones de la atmósfera de Júpiter situadas por encima de la capa de nubes de hidrosulfuro amónico. Esta composición explicaría el patrón que dibujaban las manchas, parecido a un ojo de buey: las zonas laterales representan vestigios de la estructura en capas de la atmósfera de Júpiter una vez la excavara el cometa y estallara hacia el exterior. - *E.M.S.*



MODELO de ordenador que simula la evolución de un penacho.

de energía se captó bien en Australia y en el Polo Sur.

Llegados a este punto, el *Hubble* había detectado los anillos en expansión de los impactos A, E y G en las regiones despejadas entre las nubes interiores de la zona central oscura y las oscuras medias lunas exteriores. Se pudo determinar que se expandían hacia fuera a unos 450 metros por segundo. La interpretación de estos rasgos del fenómeno correspondió a Andrew P. Ingersoll. Poco después de la semana del impacto, se percató de que los anillos no se desplazaban hacia fuera con la rapidez propia de las ondas de sonido; no se trataba del "estampido del penacho", como creyó inicialmente. Ahora bien, la velocidad de las ondas era la misma en todos los impactos. Por fin, Ingersoll e Hiroo Kanamori descubrieron que se había producido una onda de "gravedad interna", a la manera de las ondas que genera una piedra lanzada a un estanque.

Al avanzar la semana del impacto, el núcleo Y dejó como resto la mayor mancha producida hasta entonces, de nuevo con la zona central y la nube externa en media luna. Los astrónomos aficionados habían comprobado ya que esas marcas oscuras de Júpiter eran tan grandes y densas, que podían observarlas con sus telescopios domésticos. Los núcleos H, K y L vinieron precedidos por una larga cadena de partículas que, al entrar en la atmósfera, produjeron, antes de la llegada de la parte principal del núcleo, un resplandor infrarrojo creciente. La sonda *Galileo* realizó una serie de atractivas "instantáneas" del brillante meteoro y del penacho incandescente en ascenso creados por el impacto de W, el núcleo final, al estrellarse contra Júpiter. La secuencia de imágenes tomadas por el *Hubble* concluía con una vista del desplome del penacho sobre la mancha que había generado antes el núcleo K.

Pese a las numerosas observaciones de ese espectacular episodio, no se han despejado todavía todos los interrogantes. ¿De qué tamaño eran los núcleos? ¿Consistían en enjambres de cuerpos pequeños o eran fragmentos sueltos y enormes? ¿Cuánta energía radiaron al colisionar? La diversidad de los efectos y la enorme cantidad de datos —más de los que se hayan recogido de cualquier otro fenómeno en la historia de la astronomía— impiden un resumen lineal y sencillo. Del mismo modo que los debates que precedieron al impacto insistían en la necesidad de coordinar las observaciones, las sesiones celebradas con posterioridad se concentran en la comparación de los datos a la búsqueda de una explicación coherente.

El cometa S-L 9 empezaría a vagar por el sistema solar exterior más allá de la órbita de Neptuno. Una serie de grandes acercamientos a Júpiter alteraron poco a poco su período orbital, que pasó a ser de una rotación alrededor del Sol cada varios miles de años a una cada década. Los cálculos orbitales más recientes, realizados por Paul W. Chodas, indican que en torno a 1929 (el año en que se produjo otro cataclismo, pero en aquella ocasión en el mercado de valores), el cometa se acercó lentamente a Júpiter, lo que permitió a éste capturarlo y convertirlo en una luna. Pero la órbita resultante, con un período de dos años, era inestable. Algunas rotaciones seguían elipses estrechas, otras eran más o menos circulares. En 1992, fecha en que la órbita era muy elíptica, el cometa pasó tan cerca de Júpiter que se rompió en pedazos.

La desintegración inicial dispersó el material del cometa y lo convirtió en un torrente de restos. Erik Y. Asphaug y Willy Benz han demostrado que la laxa ristra de desechos pudo congregarse en núcleos diferenciados por efecto de la atracción gravitato-

ria mutua de los fragmentos. Nosotros sospechamos que en algunos núcleos había trozos grandes, de una sola pieza, del cometa fracturado, pero no en todos.

Tras el momento de la desintegración principal, continuó la división de algunos de los núcleos formados con anterioridad. Ignoramos cómo sucedió este segundo proceso de fractura. Es posible que la presión interna del gas rompiese los trozos grandes; quizá los desmenuzó la fuerza de las colisiones entre los fragmentos que viajaban juntos en el enjambre. Los núcleos mayores no medirían más de un kilómetro o dos. Estos núcleos no llegaron a completar ni siquiera una órbita completa más antes de chocar contra el flanco de Júpiter. Cuando lo hicieron, es probable que la energía liberada en cada uno de los mayores impactos fuese igual a la que desprendería la explosión simultánea de cientos de miles de las bombas de hidrógeno más potentes.

Las ingentes cicatrices oscuras que rasgaron Júpiter fueron extendiéndose hasta enlazarse; poco a poco se van difuminando. En el momento de redactar este artículo, casi un año después de las colisiones, se podía todavía apreciar una débil banda oscura a lo largo de la línea que dibujan los lugares de los impactos. Nunca se habían visto nubes oscuras así en Júpiter hasta ahora. Verdaderamente se trató de un fenómeno insólito e impresionante.

La frecuencia de los impactos depende de la escala del cuerpo implicado. Aunque no sabemos todavía el tamaño que tenía este cometa antes de fragmentarse, unos supuestos razonables nos llevan a estimar que el choque de una serie de núcleos del estilo del S-L 9 ocurre menos de una vez cada varios miles de años. Confesamos, pues, nuestro gozo por haber vivido hoy, haber descubierto el cometa en su camino hacia Júpiter y haber asistido a la llamarada gloriosa de su muerte.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE QUEST FOR COMETS. David H. Levy. Plenum Press, 1993.

IMPACT!: COMET SHOEMAKER-LEVY 9 COLLIDES WITH JUPITER. Número especial de *Sky and Telescope*, vol. 88, n.º 4; octubre 1994.

COMET SHOEMAKER-LEVY 9. Sección especial en *Science*, vol. 267, págs. 1277-1323; 3 de marzo de 1995.

IMPACT JUPITER: THE CRASH OF COMET SHOEMAKER-LEVY 9. David H. Levy. Plenum Press (en prensa).

Taller y laboratorio

Wayne Garver y Frank Moss

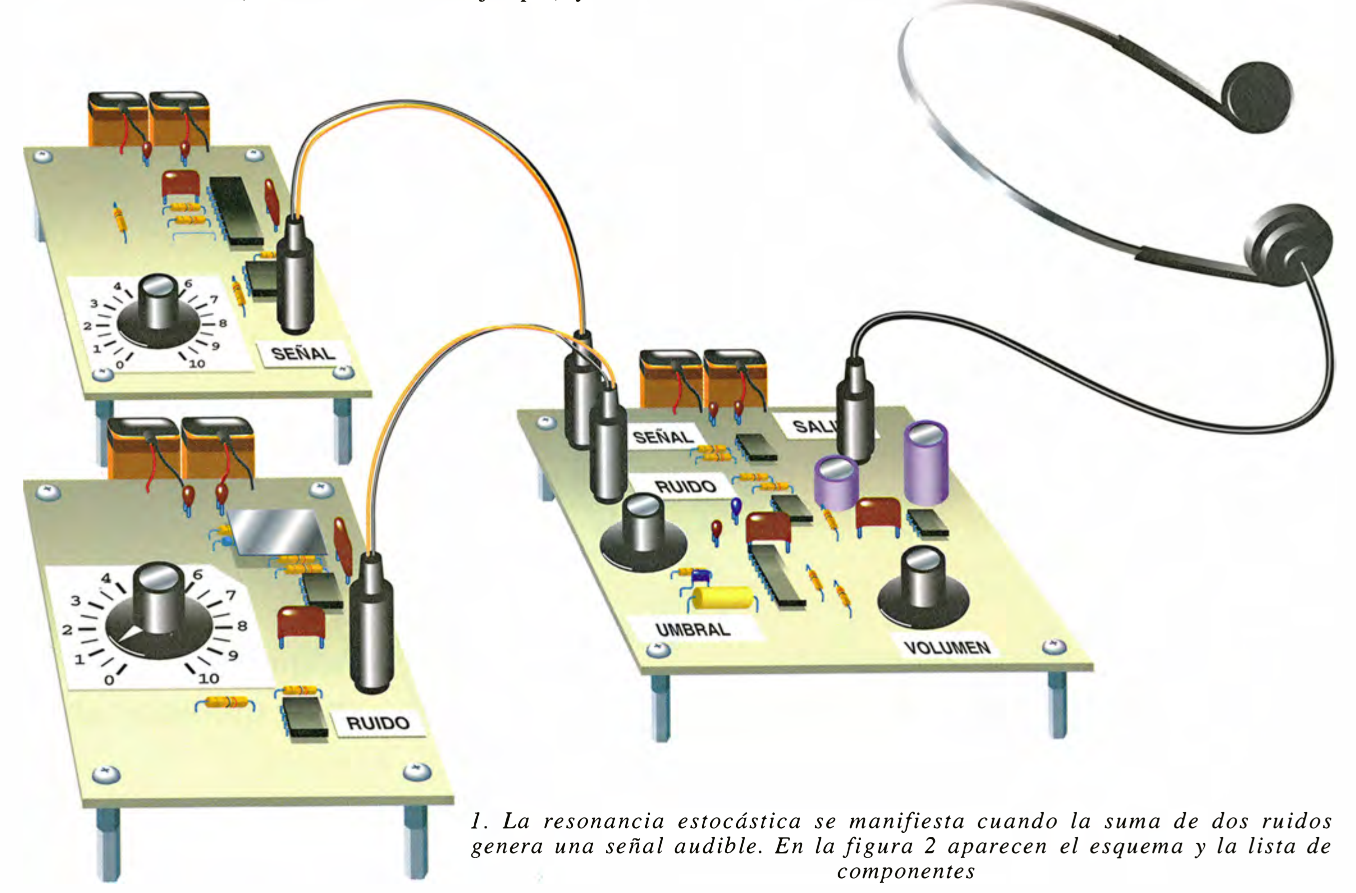
Detección de señales con ruido

En electrónica, ruido es una palabra que casi siempre suena muy mal, lo que no obsta para que aparezca hasta en los componentes de más cuidada manufactura. La temperatura ambiental hace que los electrones se muevan al azar, un proceso que introduce unas desviaciones de tensión eléctrica que nuestros oídos perciben como un silbido y un rumor sordo. Hay casos, no obstante, en que el ruido puede ser útil, esencial incluso, para la transmisión de información. En líneas generales, es capaz de elevar una señal débil por encima del umbral de detección. Durante los diez últimos años, los investigadores han comenzado a admitir que este fenómeno, llamado resonancia estocástica, podría representar un papel en numerosos hechos de naturaleza diversa, desde la aparición de los períodos glaciales hasta el intercambio de señales entre las neuronas (*véase* "Las virtudes del ruido de fondo", por Frank Moss y Kurt Wiesenfeld, en este mismo número).

Vamos a describir dos experimentos. El primero muestra la utilidad del ruido para hacer resaltar una señal; el segundo ilustra la notable capacidad del cerebro para centrar la atención en una determinada conversación dentro de un restaurante lleno de gente, o sea, para extraer información del ruido de fondo.

Nuestro dispositivo clave será un detector de umbral (que representa la manifestación más sencilla de resonancia estocástica). Este instrumento envía una señal sólo en caso de recibir una entrada de intensidad suficiente. El proyecto necesita, además, otros dos dispositivos: un generador de señal y un generador de ruido. Aparte de estos tres módulos, precisaremos una fuente de música (un reproductor de cintas ordinario, por ejemplo) y unos auriculares. Los dos generadores y el detector pueden construirse fácilmente con componentes electrónicos baratos, con un precio total que no debe rebasar las 12.000 pesetas. (Nosotros hemos recurrido a la empresa Digi-Key Corporation, de Thief River Falls.) Los componentes pueden ensamblarse sobre una placa base (una placa de plástico con numerosos zócalos que permiten establecer conexiones sin necesidad de soldar) o mejor sobre tarjetas de circuito impreso. Los componentes decisivos son circuitos integrados conocidos por amplificadores operacionales ("op-amps")

El módulo detector de umbral requiere el máximo número de componentes (*véase la figura 2*). El amplificador operacional LF411 suma el ruido y la señal (procedente ésta del reproductor de cintas o del generador de señal). Esta señal de ruido se aplica seguidamente al amplificador



1. La resonancia estocástica se manifiesta cuando la suma de dos ruidos genera una señal audible. En la figura 2 aparecen el esquema y la lista de componentes

operacional LM311, que compara la tensión de la señal de ruido con una tensión umbral. Esta tensión se ajusta mediante el potenciómetro (o resistencia variable) de 10 kilohm.

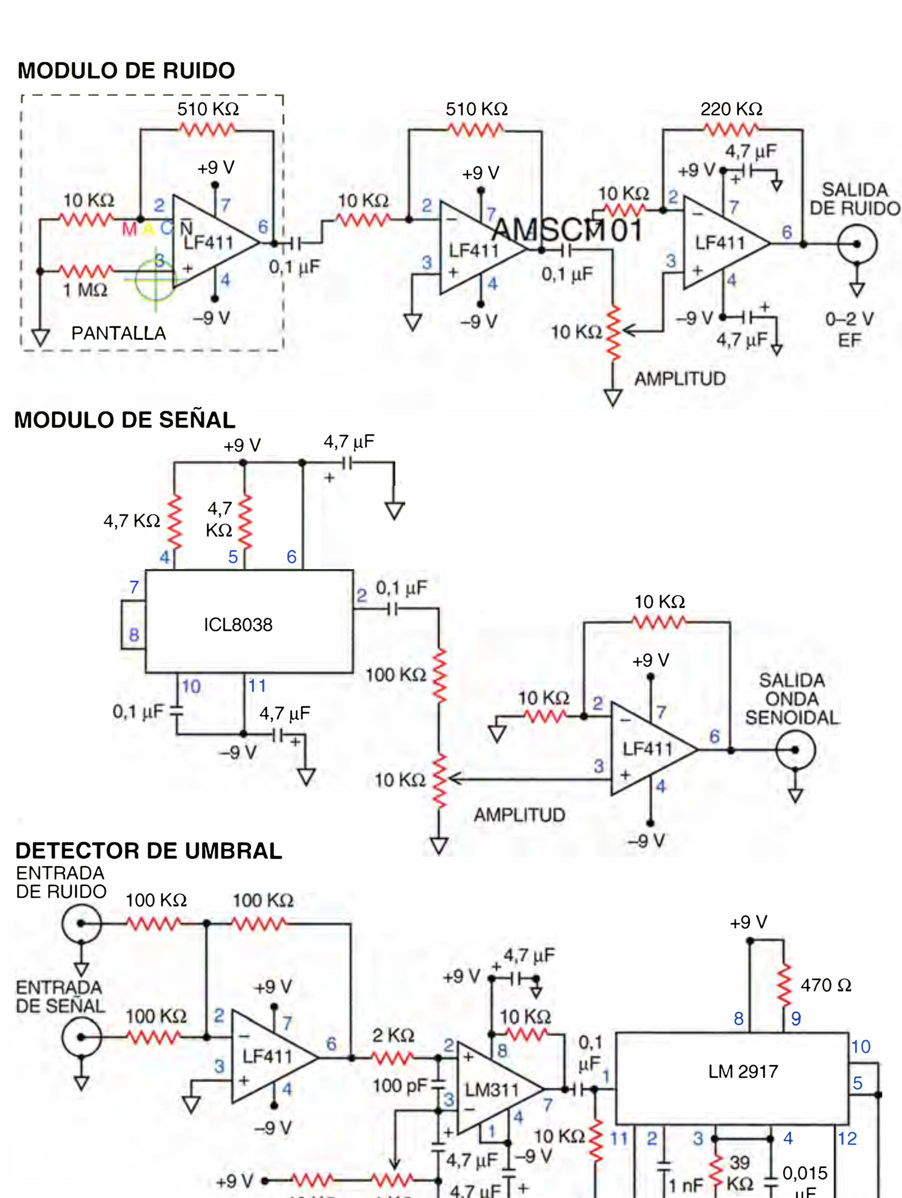
Cuando la señal de ruido es inferior al umbral, la salida del amplificador operacional es de –9 volts; pero cambia rápidamente a +9 volts cuando la señal de ruido traspasa el umbral. El amplificador operacional LM2917 mide la velocidad media a la que tiene lugar ese cambio y la convierte en una tensión que es amplificada por el amplificador operacional LM386, cuya salida está conectada a los auriculares. El potenciómetro conectado al LM386 controla el volumen del sonido.

El generador de ruido se basa en la agitación térmica de los electrones de una resistencia de un megaohm. Esta gran resistencia está conectada a la entrada positiva del amplificador operacional LF411 en el terminal 3, donde aparece una tensión fluctuante, llamada ruido de Johnson. Esta resistencia y su amplificador deben estar apantallados contra las señales extrañas, tales como las líneas eléctricas domésticas a 60 hertz. Puede bastar con cubrirlos con un pequeño trozo de acero procedente de la tapa de un bidón. Además, pondremos la pantalla a tierra: estañosuéldela al plano de tierra de la tarjeta de circuito impreso por debajo de la resistencia. Los amplificadores operacionales LF411 funcionan como amplificadores de alta ganancia. El nivel de ruido puede ajustarse con el potenciómetro de 10 kilohm.

En el módulo generador de señal, un microcircuito ICL8038 genera una señal de tensión senoidal de una frecuencia de unos 660 hertz. El LF411 sirve de amplificador y un potenciómetro de 10 kilohm regula la amplitud de la señal.

El procedimiento más cómodo para construir estos módulos es con tarjetas de circuito impreso. En las tiendas de artículos electrónicos podrán adquirirse los cables de audio para conectar el módulo detector de umbral al reproductor de cintas y los módulos de señal y de ruido. Necesitará dos cables de conexión provistos de clavija macho para auricular (como los que se emplean en los que se enchufan a los reproductores de casetes portátiles) en ambos extremos. Cada módulo necesitará dos baterías de 9 volts, una para las tensiones de alimentación positivas y otra para las negativas.

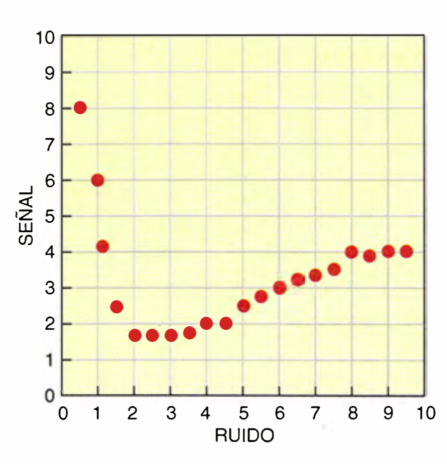
En el primer experimento se utiliza el reproductor de cintas y el módulo de ruido conectados al módulo



2. Los esquemas de los circuitos muestran cómo conectar los componentes que facilita Digi-Key Corporation

COMPONENTES A COMPRAR

C.	COMPONENTE	CODIGO	C.	COMPONENTE	CODIGO
5	CIRCUITO INTEGRADO LF411	LF411CN	2	RESISTENCIA 510 KΩ 1/4 W	510KQBK
1	CIRCUITO INTEGRADO LM311	LM311N	2	POTENCIOMETRO 10 KΩ	308N103
1	CIRCUITO INTEGRADO LM2917	LM2917N	2	POTENCIOMETRO 1 KΩ	308N102
1	CIRCUITO INTEGRADO LM386	LM386 N-1	1	CONDENSADOR 0,015 µF 100 V	EF1153
1	CIRCUITO INTEGRADO ICL8038	ICL803 8CCPD	6	CONDENSADOR 0,1 µF 100 V	E1104
1	1 RESISTENCIA DE PELICULA METALIZADA	1.00MXBK	7	CONDENSADOR 4,7 µF 25 V	P2047
			1	CONDENSADOR 220 µF 16 V	P6621
4	RESISTENCIA 100 KΩ 1/4 W	100KQBK	1	CONDENSADOR 100 µF 16 V	P6620
1	RESISTENCIA 39 KΩ 1/4 W	39KQBK	1	CONDENSADOR 1 nF 60 V	P4812
1	RESISTENCIA 2 KΩ 1/4 W	2KQBK	1	CONDENSADOR 100 pF 60 V	P4800
9	RESISTENCIA 10 KΩ 1/4 W	10KQBK	5	CLAVIJA 3,5 MM	MJ-3536
2	RESISTENCIA 4.7 KΩ 1/4 W	4.7KQBK	6	CLIP BATERIA 9 V	72K
1	RESISTENCIA 220 KΩ 1/4 W	220KQBK	4	BOTON	8558K
1	RESISTENCIA 470 Ω 1/4 W	470QBK	12	AISLANTE SEPARADOR	J176



3. La sensibilidad a un tono de 660 hertz alcanza su valor óptimo cuando el botón de nivel de ruido se ajusta entre 2 y 5, donde la señal no necesita ser fuerte para percibirse

detector de umbral. Conecte la salida del reproductor de cinta al terminal con la marca “señal” del módulo detector de umbral. Emplee el otro cable para conectar el módulo de ruido al terminal “ruido” del módulo detector de umbral. Por último, enchufe los auriculares a la salida.

Ponga en marcha el reproductor de cintas y aumente su volumen hasta un valor más bien elevado; unos dos tercios del máximo, por ejemplo. Sitúe el ajuste de volumen del módulo detector de umbral aproximadamente a medio camino entre el cero y el máximo. Con el nivel de ruido a cero, ajuste el umbral hasta el grado en que comience a oír la música sin esforzarse (la oirá distorsionada dada la naturaleza del circuito). Una vez conseguido, el ajuste de umbral no hay que volverlo a cambiar. Después, baje el volumen en el reproductor de cinta hasta que ya no oiga la música. El sonido será entonces una señal débil, subumbral.

En ese momento estará usted en condiciones de añadir ruido para recuperar la música. Poco a poco gire hacia arriba el mando de amplitud de ruido. Al principio, oirá sonidos ininteligibles, pero conforme aumente el nivel de ruido empezará a percibir la música. Sin embargo, a partir de ese punto el ruido irá degradando la música hasta que sólo vuelva a oír el ruido. Puede usted experimentar con distintos ajustes del umbral. Por lo general, cuanto más bajo sea el umbral, menos ruido se requerirá para producir una respuesta inteligible.

En el segundo experimento el generador de señal de 660 hertz sustituye al reproductor de cintas. La idea es medir el umbral de percepción de una persona sobre una señal incrustada en ruidos de distintas intensidades. Le será necesario graduar los botones de todos los potenciómetros; numere la escala de 0 a 10 a intervalos separados regularmente. Necesitará también una hoja de papel cuadriculado ordinario para representar gráficamente la señal en función del nivel de ruido.

Colóquese los auriculares y ponga en cero el botón de ruido. Gire hacia arriba el botón de señal hasta el 8. Entonces, sin mirar al botón, ajuste el umbral hasta el punto en que apenas oiga el tono de 660 hertz. Esas posiciones de los botones puede emplearlas como primer punto registrado (ruido = 0, señal = 8).

Gire ahora hasta el 1 el botón de ruido. Ajuste el botón de señal (no el de umbral) hasta que apenas oiga el tono; lleve al gráfico ese punto. Repita la misma maniobra para todas las graduaciones del botón de ruido hasta la 10 (*véase la figura 3*). En la gráfica, debe observarse que los datos atraviesan por un mínimo para una graduación del ruido comprendida entre 2 y aproximadamente 5. Ese es el nivel de ruido óptimo para detectar el tono de 660 hertz. Adviértase que la forma detallada de este conjunto de datos puede que dependa de la capacidad de cada uno para percibir la señal en medio del ruido. Intente hacer las mismas mediciones con varios amigos y represente por separado las gráficas. ¿Nota grandes diferencias? ¿Depende la capacidad para detectar la señal en medio del ruido de la edad o de la sensibilidad auditiva? Para variar, altere el tono de 660 hertz cambiando el condensador de 0,1 microfarad, situado entre las patillas 10 y 11 del amplificador operacional ICL8038. La frecuencia es igual a $6{,}3829 \times 10^{-5}$ dividido por el valor de la capacidad (más concretamente, frecuencia $= 0{,}3/(RC)$, donde R es 4700 ohms y C es la capacidad en farads.

Wayne Garver vende circuitos integrados y otros adminículos de la construcción de los experimentos relatados. Su dirección es Department of Physics and Astronomy, University of Missouri at St. Louis, MO 63121.

WAYNE GARVER y FRANK MOSS colaboran en la Universidad de Missouri en St. Louis. Garver es habilísimo en la construcción de circuitos electrónicos para clases prácticas. Moss es coautor del artículo sobre resonancia estocástica que aparece en este mismo número de la revista.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

La forma de las lágrimas: un engaño consentido

La realidad
es un arco iris
Has de buscarla
entre la lluvia y el sol

Estás pisando la tierra,
¿por qué te inquietas?
Sabes bien, estoy seguro,
que se pega a tus zapatos

Hay agua en tu vaso;
tu vaso está en la mesa,
tiene la mesa cuatro patas,
plantadas sobre el suelo.

El guitarrista rasgueó un último acorde y los cantantes callaron. Guardó el instrumento en su estuche y lo dejó apoyado contra la pared. "Amigos, un descanso", dijo, y los cantantes se encaminaron a la barra. Andoni los siguió, regresando minutos después con aire triunfal, cargado con dos espumosas cervezas y un "Blue moon". Se adueñó de una jarra y le acercó la otra a Diana. Me dedicó una mirada desdeñosa y displicente al empujar hacia mi rincón el Blue moon.

Verán, me ha dado por los cócteles de fantasía, ¿saben?, y no tengo por qué pedir disculpas a nadie. Tres cuartas partes de vodka, otro tanto de tequila, una medida de curaçao azul, limonada al gusto, todo sobre hielo picado y el resultado es... ¡brillante! "Creo que en la próxima ronda voy a tomar un 'Pearl Harbour'", dije.

Andoni torció el gesto, bebió un gran sorbo de su jarra y sonrió de oreja a oreja. "Nada como la cerveza." Depositó la jarra frente a sí. Estaba a punto de añadir algo cuando sonó claramente un ¡plink! Todos lo oímos. Andoni estaba indagando su origen cuando volvió a oírse con claridad.

"Es tu cerveza", dijo Diana.

"La cerveza no hace ¡plink!", opuso Andoni.

"La tuya sí. Son gotas de lluvia que caen del techo. Tiene que haber una gotera en el tejado."

Jamás he visto a Andoni actuar con tanta rapidez. Asió la jarra y la resguardó junto a su pecho, como una madre que protegiera de las hienas a su recién nacido. "Se diluye," explicó con gesto torvo. "¿No crees que habría que procesar al dueño por aguar la cerveza?"

"Andoni, por favor, tan sólo han sido dos gotas."

"Es una cuestión de principios."

"Pues el mío es no fastidiar al patrón de un local decente. No ha sido adrede."

Nos quedamos mirando la caída de las gotas, que al hacer impacto en la mesa proyectaban en todas direcciones una nubecilla de gotitas diminutas. "No veo qué te tiene tan fascinado", comentó Diana.



1. La "lágrima" clásica. Pero, ¿tiene realmente esta forma?

"Estoy intentando ver... Pero no, van demasiado deprisa. No es de sorprender que todo el mundo esté equivocado."

"Esté equivocado... ¿en qué?"

Andoni agitó sus manos gordezuelas para imponernos silencio. "Diana, quiero preguntarte una cosa muy sencilla y fácil de responder. ¿Qué forma tienen las lágrimas?"

La joven se quedó cortada un momento.

"Pues... forma de lágrima, claro", balbuceó.

Andoni le pasó una servilleta de papel y un bolígrafo. "Dibuja una, por favor." Ella esbozó una especie de glóbulo parecido a un renacuajo: una cabezota redondeada con una cola puntiaguda que apuntaba hacia arriba [*véase la figura 1*].

Andoni examinó el dibujo. "¿Qué te hace pensar que tiene esa forma?"

"Bueno, ése es el aspecto que tienen. La forma clásica de una gota."

"¿Estás segura?" Otra gota hizo impacto en la mesa. "La has visto al caer, ¿no es así?"

"La verdad, no. Va demasiado rápida. Pero ésa es la forma con que todo el mundo las dibuja." Andoni asintió con la cabeza, pero no dijo nada. "¿Pretendes decir que todo el mundo las dibuja mal?"

"Sin comentarios."

"Pues cuando un grifo gotea, se forma primero una especie de hinchazón que va engrosándose hasta que una parte se desprende. Después se crea una cola puntiaguda, justo antes de que la gota se suelte."

"Dibuja eso también, haz el favor."

La joven lo hizo [*véase la figura 2, arriba*].

"Humm... Y en tu opinión la gota conserva la cola puntiaguda mientras cae."

"Eso es."

"Pero el agua que pende del grifo vuelve a tomar forma redondeada."

"Evidente. Ello es debido a la tensión superficial."

"¿Y por qué la tensión superficial no redondea también la cola de la gota que cae?"

"Porque la sigue detrás, a rastras, como si dijéramos, ya que la gota está cayendo."

"¿Tú crees?"

Diana negó con la cabeza. "No, eso no tiene sentido. La cola también debería redondearse. Las lágrimas tienen que ser aproximadamente

esféricas. Un poco achatadas, tal vez, por la resistencia del aire."

Andoni afirmó con el gesto. "También podrían bambolearse y oscilar. Así que tú estimas que la figura debería en realidad ser más o menos así?" [*Véase la figura 2, abajo.*]

"Me imagino que sí. Ya no estoy muy segura." La chica parecía confundida.

"¿No es sorprendente lo tenue de nuestra captación de la realidad?"

"Algo he leído sobre este asunto", tercié. "Lo que más me llama la atención es que la respuesta no ha sido descubierta hasta hace poco. Son millares, literalmente, los estantes de biblioteca ocupados con estudios científicos de los fluidos... seguro que alguien se tomó la molestia de observar la forma de una gota de agua. Sin embargo, en la bibliografía inicial sólo aparece un dibujo correcto, realizado hace más de un siglo por el físico Lord Rayleigh, ¡y está a escala natural!" Tuve que detenerme a tomar aliento. "Lo que significa que era tan diminuto que prácticamente nadie se fijó en él."

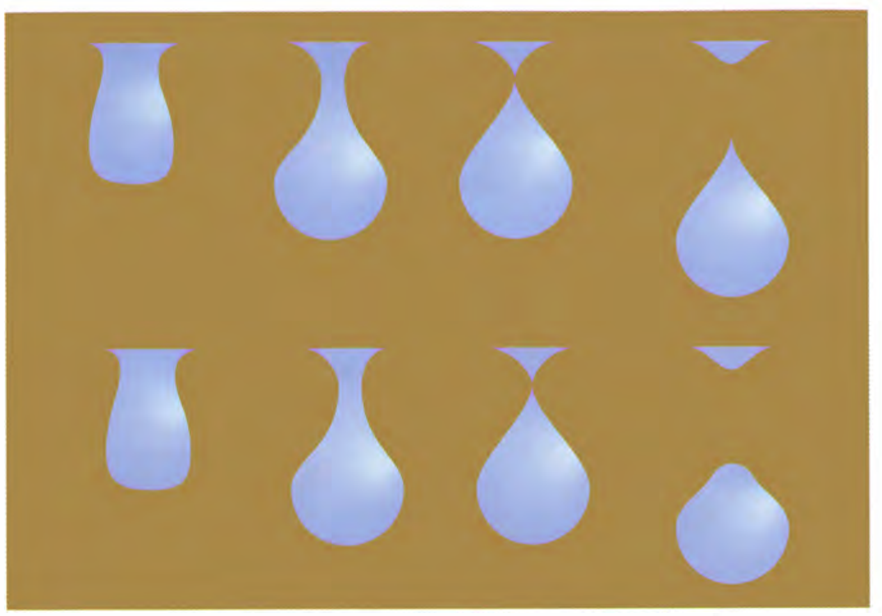
"¡Cuánta razón tienes!", dijo Andoni. "En premio, la próxima ronda corre de tu cuenta. La forma auténtica no fue ampliamente difundida hasta 1990, cuando Howell Peregrine y sus colegas de matemática aplicada de la Universidad de Bristol fotografiaron una gota de agua al desprenderse y descubrieron que es mucho más complicada —y mucho más interesante, también— de lo que jamás se podría imaginar." Trazó rápidamente una serie de esbozos mientras yo me abría paso hasta la barra. A mi regreso, con dos jarras de cerveza y un "Portsmouth" (se les había acabado el licor de cerezas, por lo que no se podía ni pensar en un Pearl Harbour), Andoni acababa de terminarlos [*véase la figura 3*].

"¡Qué cosa más rara!", exclamó Diana.

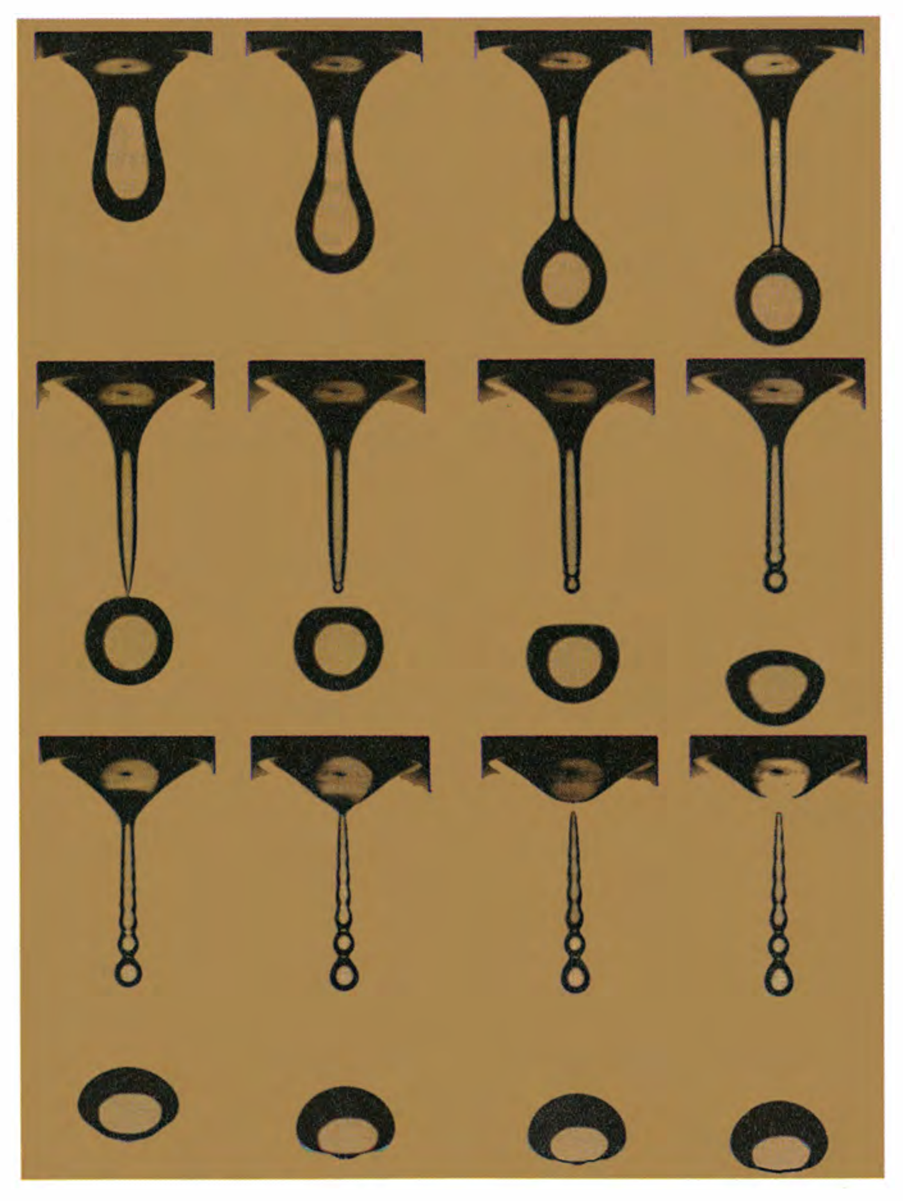
"No. Sólo es zumo de naranja, vodka, galiano y una rodaja de pepino..."

"No hablo de tu bebida, sino de la forma de la gota."

"No es la que casi todo el mundo espera", opinó Andoni. "Al principio se trata de una gotita en formación, que pende de la boca del grifo. Aparece después una especie de estrangulamiento, que se estrecha, como si fuera a dar la forma clásica de la lágrima. Pero en lugar de romperse y crear una cola corta y puntiaguda, el estrangulamiento se alarga, generando una suerte de hilillo cilíndrico, con una gota casi perfectamente esférica pendiente de su extremo."



2. Al desprenderse una gotita, ¿la cola es puntiaguda o roma?



3. ¡Nada de eso! Se parece a esto

Tomé el dibujo y lo examiné. "Entiendo la razón de que la gota se vuelva esférica. Está cayendo tan lentamente que la gravedad es despreciable. Así que trata de minimizar la energía de su tensión superficial, y eso la hace adoptar la forma esférica."

"¿Por qué?"

"Porque la tensión superficial es proporcional al área, y, para un volumen dado, la esfera tiene superficie mínima." Andoni me dio una fuerte palmada en la espalda. "Pero no veo a qué se debe la formación del filamento."

"Sobre todo, a la viscosidad", explicó Andoni. "La pegajosidad. Si el fluido fuese jarabe en vez de agua, no te sorprendería que se formase un largo filamento, ¿verdad? El agua es bastante viscosa, aunque no tanto como el jarabe."

"Todo eso está muy bien", dijo Diana. "Pero, ¿por qué no se alarga el hilo indefinidamente?"

"¡Inestabilidad!", grité, sobresaltando a tres señoras mayores que ocupaban la mesa contigua jugando a la canasta. Me dirigieron miradas de desaprobación. "Un filamento demasiado largo se vuelve inestable."

"Exactamente", apoyó Andoni, abriendo una bolsa de chips de cortezas con cebolla. "¿Quieres?", dijo, agitando vagamente la bolsa en mi dirección. Negué con la cabeza. "La inestabilidad hace que el filamento comience a estrecharse, justo en el punto donde toca a la esfera, hasta que desarrolla una punta aguda. En esta fase, la forma recuerda a una aguja de calcetar que está apenas pinchando a una naranja. Después la naranja se suelta de la aguja y cae, pulsando ligeramente en su caída: la gota se ha desprendido."

"Pero eso sólo es la mitad del cuento." Se zampó un puñado de chips y los hizo bajar con un trago largo de cerveza.

"A continuación, la punta de la aguja empieza a redondearse y una serie de ondículas diminutas retroceden por la aguja hacia su raíz, haciéndola parecerse a una sarta de perlas de tamaño decreciente. Por fin, el hilillo de agua colgante se estrecha hasta convertirse en una punta aguda en el extremo superior, y también se desprende. Al caer, su extremo superior se redondea y a lo largo del filamento torna a viajar un tren de ondas muy similar al anterior."

Diana y yo nos retrepamos en nuestros asientos, dejamos perdida la mirada en el espacio, y examinamos los dibujos de Andoni. "Asombroso", dijo Diana. "Jamás hubiera imaginado que el goteo del agua fuera tan complicado."

"No", añadí yo. "Ni tampoco que fuera tan *singular*. Lo que me hace comprender por qué nadie había estudiado antes el problema con suficiente detalle matemático."

"¿Por qué no?"

"Porque es demasiado difícil. Verás, cuando la gota se desprende surge una *singularidad* en el problema, un punto en el que la descripción matemática se torna muy antipática. La singularidad es la punta de la 'aguja'."

"Pero, ¿por qué se produce esta singularidad? ¿Por qué es tan complejo el desprendimiento de la gota?"

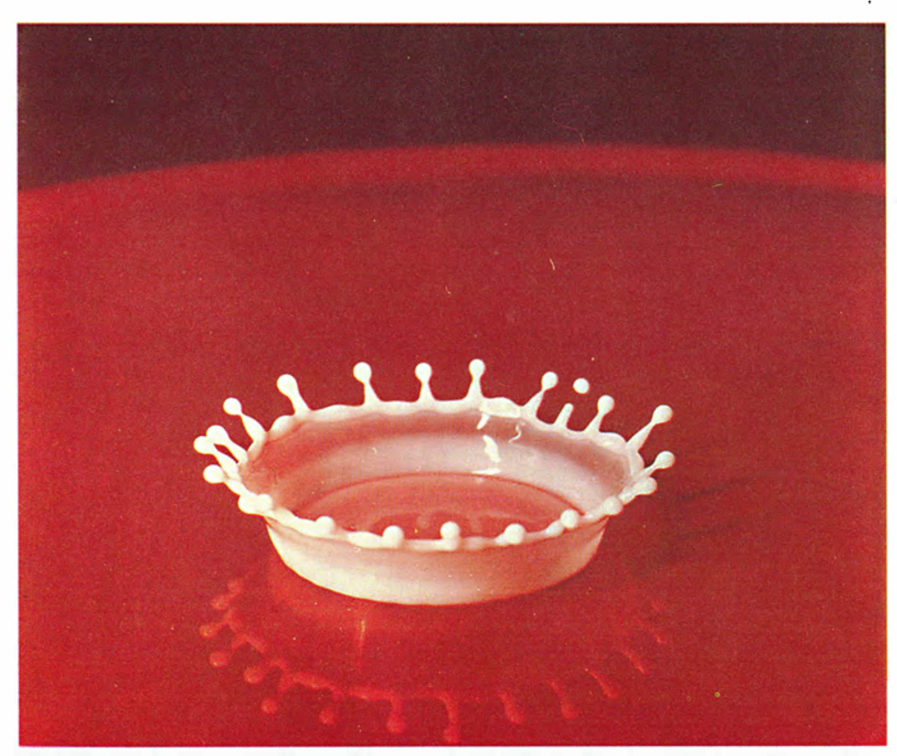
Andoni terció de nuevo. "Porque en 1994 los físicos J. Eggers y T. F. Dupont demostraron que la situación es consecuencia de las ecuaciones de Navier-Stokes para el movimiento de fluidos. Simularon las ecuaciones en un ordenador y reprodujeron las observaciones de Peregrine." Nos miró con sonrisa beatífica y feliz. Cuando se percató de que yo no había quedado tan impresionado como esperaba, se le puso la cara seria. "¿A qué viene tanto escepticismo? Fue un trabajo magnífico."

"Totalmente de acuerdo", respondí. "Yo estaría muy ufano de haber hecho algo que valiera la mitad. Pero no me parece que realmente sea ésa la solución del problema. Resulta *tranquilizador* que las ecuaciones de Navier-Stokes pronostiquen la situación correcta, pero en sí mismo eso no me ayuda a comprenderla. Hay una gran diferencia entre triturar números y lograr que la mente comprenda lo que significan las soluciones."

Andoni se acarició la barbilla. "Ya estás otra vez con el tema de la filosofía de la explicación, ¿verdad?"

"Me refiero al tipo de explicación que me hace sentir que he comprendido algo. Supongo que se puede calificar de filosofía, estoy de acuerdo. Desde luego, no se trata de ciencia o de matemáticas en sí; lo que me interesa es la forma en que comprendemos la ciencia y las matemáticas.

"El tipo de explicación que yo quisiera consistiría en una cadena sencilla de consideraciones lógicas que se ocupasen de la forma en sí misma y me convencieran de que eso es lo que tiene que ocurrir. No estoy seguro de que nadie disponga de una explicación de la caída de la gota que cumpla exactamente estos requisitos, pero se me ha venido a la cabeza un trabajo de X. D. Shi y colaboradores, de la Universidad de Chicago, que apunta en esa dirección. La idea esencial, que estaba presente en el trabajo de Peregrine, consiste en un tipo particular de solución de las ecuaciones de flujo, llamada *solución por semejanza*."



4. Una gota de leche que impacta en un plato forma una salpicadura en forma de corona. Cada punta de la corona es similar a la quinta imagen de la figura 3, aunque invertida

"Lo que significa..."

"Una solución provista de cierto tipo de simetría que la hace matemáticamente tratable. Es sibisemejante en el eje temporal, es decir, que reproduce su estructura a menor escala en diferentes momentos. Esa es la razón de que, cuando la garganta del filamento comienza a estrecharse, siga haciéndolo y se torne cada vez más fino hasta formar una singularidad puntual."

"Ahora no te sigo", dijo Andoni.

"Como puedes suponer, estoy prescindiendo de un montón de detalles matemáticos. Pero la idea de una solución por semejanza explica la forma de la singularidad, suponiendo que exista alguna de ese tipo. Aquí es donde interviene la técnica de... "

"¡Oye!", interrumpió Diana. "Acabo de darme cuenta de que existe una fotografía clásica que muestra perfectamente la singularidad. La única diferencia es que se trata de leche y no de agua, y que las gotas no van hacia abajo."

"¿Cómo dices?"

"Está en *On Growth and Form*, de D'Arcy Thompson. En su edición de 1942 (la obra apareció por vez primera en 1917) tiene una portada célebre, una gota de leche que impacta sobre un plato. La salpicadura tiene forma de corona."

"¡Ah, sí! La foto fue tomada por Harold Edgerton, del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Pero no se parece a mis dibujos."

"Desde luego que sí. Cada "punta" de la corona es como un glóbulo situado en la extremidad de un tubo, y los tubos se estrechan a modo de agujas, con la punta tocando los glóbulos."

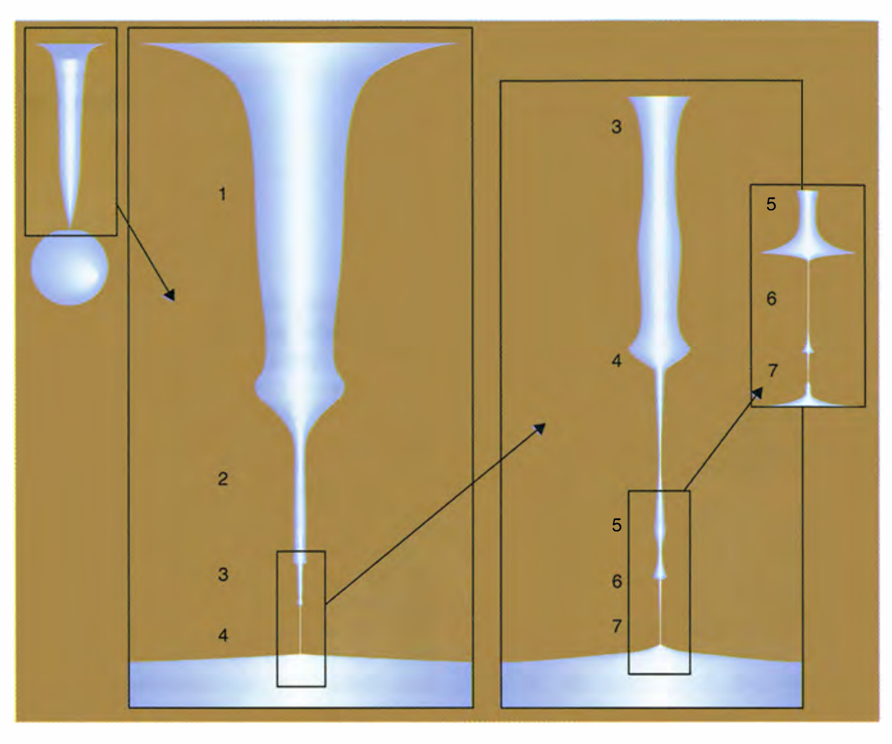
"El artículo de Peregrine hacía hincapié en que toda la compleja serie de acontecimientos es universal", dije. "Al desprenderse las gotas se observa siempre exactamente la misma secuencia de formas... en fluidos de viscosidad adecuada."

Andoni quiso verificar la viscosidad de su cerveza. Esta se deslizó muy fácilmente, de forma muy distinta al jarabe. "¿Os he contado lo de cuando fabriqué una bacteria a la medida, que convertía el crudo en melaza?", preguntó. "Estuvo a punto de destruir los yacimientos petrolíferos del Mar del Norte..."

"Sí, por lo menos cien veces", le cortó Diana. "Y saliste del paso inventando una levadura que fermentaba la melaza en alcohol, creando así un yacimiento cervecero...."

"Agotado hace mucho", suspiró Andoni.

"Hablando de melaza", tercié yo.



5. Al observar cada vez más de cerca el proceso de desprendimiento de una gota de fluido viscoso vemos la aparición de sucesivos estrechamientos

"El grupo de X. D. Shi llevó más allá la idea de solución por semejanza y se preguntó cómo dependería la forma de la gota al desprenderse de la viscosidad del fluido. Efectuaron un sinfín de experimentos, utilizando disoluciones de glicerina y agua para lograr diferentes viscosidades. También realizaron simulaciones computarizadas y desarrollaron el planteamiento teorético mediante soluciones por semejanza. Lo que descubrieron es que, en el caso de líquidos más viscosos, se produce un segundo angostamiento del filamento antes de la formación de la singularidad y el desprendimiento de la gota."

"¿Quieres decir que es algo así como una naranja pendiente de un trozo de hilo colgante de la punta de una aguja de calcetar?", preguntó Diana.

"Exactamente. Y ahora, gracias al proceso de sibisemejanza..."

Diana se me adelantó. "A viscosidades mayores todavía se forma una tercera estrangulación— una naranja pendiente de un hilo de algodón colgado de un trozo de cordel atado a la punta de una aguja de calcetar. Y al seguir aumentando ilimitadamente la viscosidad, aumenta sin cesar el número de sucesivas constricciones. ¿Estoy en lo cierto?" [*véase la figura 5*].

"Así es. Siempre y cuando, claro está, prescindamos del límite impuesto por la estructura atómica de la materia."

"Pasmoso", dijo Andoni. "Esto nos muestra lo mucho que se puede descubrir al hacerse la pregunta adecuada."

"Nunca hay que tomar nada por resuelto", añadí. "Las preguntas más sencillas suelen tener las respuestas más sorprendentes. Pero alguien tiene que plantear la cuestión, y no conformarse con dar por supuesto que la respuesta es la que todo el mundo esperaría."

"Tengo que haceros una pregunta sencilla."

"¿Cuál?"

"¿Os apetece tomar algo? Esta es mi ronda."

Andoni y yo la miramos, y después nos miramos el uno al otro. "La verdad es que hay preguntas sencillas que sí tienen respuestas sencillas."

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ON GROWTH AND FORM. D'Arcy Thompson, Cambridge University Press, Cambridge, 1942.

THE BIFURCATION OF LIQUID BRIDGES. D. H. Peregrine , G. Shocker y A. Symon, en *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 212, páginas 25-39, 1990.

A CASCADE STRUCTURE IN A DROP FALLING FROM A FAUCET. X. D. Shi, Michael P. Brenner y Sidney R. Nagel, en *Science* n.º 265, págs. 219-222, 1994.

Juan Casanovas, Luis Alonso y Fernando Azorín

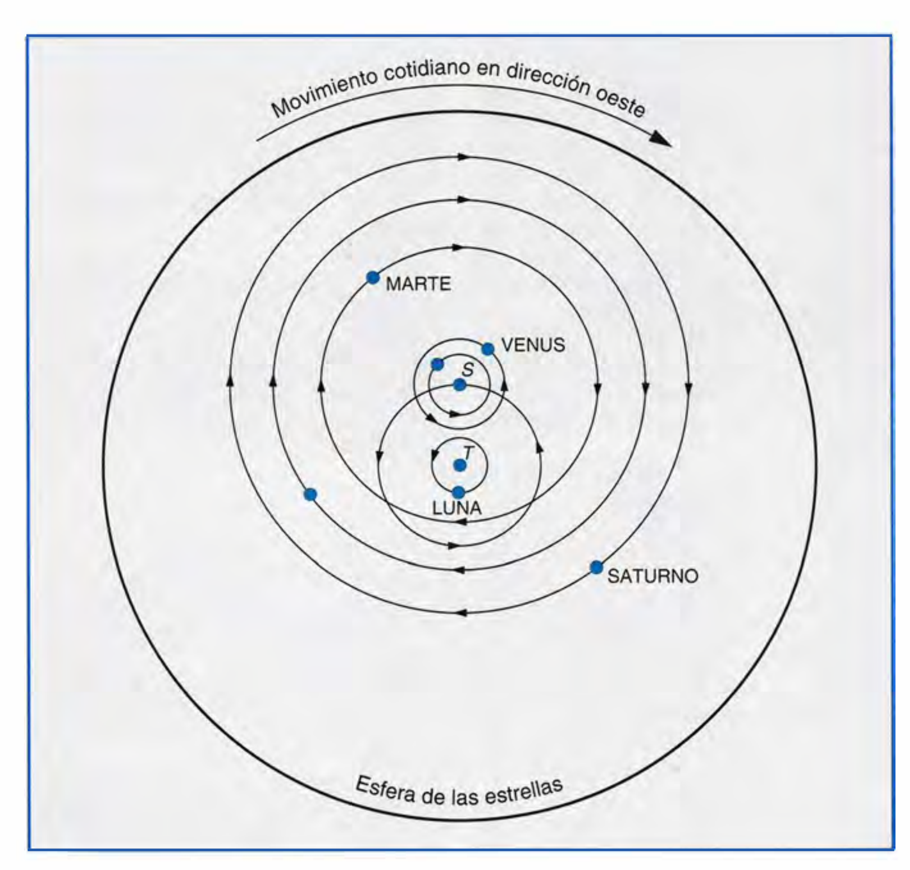
Galileo

Nueva visión

GALILEO PER IL COPERNICANISMO E PER LA CHIESA. Annibale Fantoli. Libreria Editrice Vaticana, 1993.

Es ingente la literatura existente sobre Galileo. Pese a ello este gran personaje es todavía poco conocido. Muchos se limitan a copiar y repetir viejas interpretaciones sin hacer un juicio crítico, las cuales se resienten con frecuencia de la versión de los enciclopedistas franceses del siglo XVIII sobre su condena. Estos dieron una versión muy simplista, históricamente poco precisa y, conociendo la ideología de aquel siglo, obviamente partidista. Como tampoco se puede extrapolar sin más la idea de ciencia que tenemos hoy al siglo XVII, con sus connotaciones de éxito, autonomía y prestigio social. En tiempos de Galileo, la ciencia que contaba era la filosofía, la cual tenía en poca consideración a los astrónomos matemáticos. Un gran mérito de Galileo fue su esfuerzo para que la física y las matemáticas fueran reconocidas como ciencia capaz de contribuir a nuestro conocimiento del universo.

Afortunadamente están apareciendo en los últimos años estudios que corrigen el falso mito del caso Galileo. Uno de estos estudios es el presente libro en que su autor A. Fantoli analiza todos los documentos sobre la condenación de Galileo, incluyendo los recientemente descubiertos. El autor está familiarizado con el lenguaje y filosofía escolástica prevalente en la época de Galileo, como también conoce el lenguaje eclesiástico de la Curia romana. Esto hace que el libro de Fantoli sea un paso adelante en la comprensión de las relaciones de Galileo con el Santo Oficio.



Sistema de Tycho Brahe

El subtítulo "*por el Copernicanismo y por la Iglesia*" quiere poner de manifiesto los variadísimos factores ideológicos y religiosos operantes en varios estadios de la vida de Galileo que llevarán progresivamente al choque con los filósofos, teólogos y finalmente con el Santo Oficio. El autor presenta un Galileo sinceramente preocupado por demostrar que el heliocentrismo, en el caso que no fuese aceptado positivamente por la Iglesia, al menos no fuese condenado con prisa, sin una madura reflexión. No fue Galileo el culpable de usar las Sagradas Escrituras en pro o en contra del movimiento de la Tierra, sino que fueron probablemente sus adversarios, a quienes había gravemente ofendido llevado de su carácter fogoso. Galileo, es cierto, se esforzó en hacer ver que el heliocentrismo no estaba en contradicción con la mejor exégesis de los Padres de la Iglesia como San Agustín y Santo Tomás. El error táctico de Galileo fue el de entrar en un campo que no era el suyo. No sólo esto, sino que se dirigió a una amplia audiencia escribiendo en italiano en vez de hacerlo en latín, como era práctica en el mundo académico y científico. Con esto olvidaba que el tema de la interpretación de las Sagradas Escrituras era un tema reservado a los especialistas e inoportuno. Esto no es de extrañar en aquel tiempo de controversias con los protestantes, de resultas de las cuales no se pudo evitar cierta mentalidad fundamentalista. Todo esto no justifica el decreto del Santo Oficio de prohibición del libro de Copérnico, pero sí lo explica en gran parte. Fantoli afirma que Galileo "prefirió permanecer en la Iglesia aun a costa de abandonar su nueva visión del mundo". De hecho esta visión del mundo tardaría todavía mucho en ser generalmente adoptada y cuyas pruebas decisivas no llegarían hasta comienzos del siglo posterior.

El lector apreciará la abundancia de notas y citas de documentos en el libro de Fantoli, que ocupan buena parte del libro. Esto permite una rápida primera lectura de la obra, pero se recomienda no olvidar las notas al final de cada capítulo, porque contienen aspectos importantes

que no deben pasarse por alto. Con la abundancia del material aportado, el lector podrá juzgar por sí mismo de las conclusiones del libro.

Muchos autores o por simpatía por Galileo, o entusiasmados por su brillante estilo, siguen el planteamiento seguido por él en sus controversias. Contentarse con el material sacado de sus escritos y de la correspondencia con sus "amigos" puede ser insidioso. Sus amigos eran personas generalmente bien formadas en filosofía conforme a la época y sentían la necesidad de un cambio y modernización, pero no siempre eran expertos en astronomía. Es un hecho que Galileo no siempre describe fielmente lo que dicen sus antagonistas como tampoco da una visión exacta del estado de la astronomía de su época. Es necesario conocerla si queremos ser imparciales y hacer justicia a sus opositores, quienes a veces seguían una mejor astronomía.

Tomemos, por ejemplo, la controversia entre el jesuita Horacio Grassi y Galileo que le dio ocasión para escribir *Il Saggiatore*. En ocasión de la aparición de tres cometas en el año 1618, Grassi había leído una *disertación* en el Colegio Romano sobre la naturaleza de los cometas. Grassi aportó una observación muy precisa de la paralaje de uno de los cometas (hecho generalmente ignorado) en confirmación de la teoría de T. Brahe y de Kepler, es decir, de que los cometas son verdaderos cuerpos que se mueven en el espacio interplanetario. Era práctica frecuente para estos ejercicios académicos el publicar la disertación sin el nombre del autor, y no creo se deba imaginar una voluntad expresa de los superiores de la Orden en ocultar nombres, como parece sostener Fantoli.

Galileo, celoso de su prestigio en Italia, fue siempre contrario a la astronomía del norte de Europa. Atacó a Grassi por seguir a T. Brahe, cuando en el fondo era una ataque indirecto a este astrónomo. Galileo eludió entrar en el aspecto astronómico y llevó con maestría la discusión al plano de la *filosofía natural* en la que no tenía rivales. Fantoli expone la controversia sobre los cometas con sentido crítico. Pero siguiendo el hilo del discurso de Galileo, no tenemos una visión completa del estado de los progresos en la observación y teoría de los cometas de su tiempo. Prescindiendo de quién tuvo razón o salió vencedor, descubrimos la desconfianza de Galileo por las medidas de paralaje hechas por Brahe. En el fondo se escondía el debate solapado de su tiempo de si con medidas geométricas (la paralaje) se podía llegar a conclusiones sobre el sistema del mundo.

Los mismos reparos se podrían hacer sobre el resumen que da Fantoli de las cuatro jornadas del *Dialogo sopre i due Massimi Sistemi del Mondo de Galileo*, el libro que le causó tantos sinsabores y que le costó su proceso y condena. El resumen dado por el autor queda demasiado breve para examinar todas las cuestiones de tipo astronómico que quedan poco desarrolladas. Galileo, en su lucha en favor del heliocentrismo, prescindió de las importantes contribuciones de Kepler y quiso actuar él solo y con método totalmente diverso. Creyó haber encontrado en su teoría del fenómeno de las mareas un argumento en favor del movimiento de la Tierra. Con esta teoría física, Galileo pasaba por alto la astrometría y se convertía en el nuevo campeón del heliocentrismo. Pero el "drama" de Galileo fue el no dar suficiente importancia a las observaciones confirmadas de un modo abrumador después de los viajes de los navegantes y descubridores desde el siglo XV. De la teoría galileana se deducía que el tiempo entre marea alta y baja tenía que ser de 12 horas, cuando en realidad es algo más de la mitad. Fantoli hubiese podido completar este punto mencionando la fuerte correlación entre la luna y las mareas, fenómeno conocido desde la antigüedad y que indujo a Kepler a postular una atracción mutua entre la Tierra y la Luna, teoría que Galileo tachó de infantil. El afrontar con seriedad el caso Galileo es una excelente introducción a importantes cuestiones permanentes como el del valor de las teorías científicas, sujetas a continuas revisiones, como también el problema siempre actual de las relaciones entre el ciencia y la teología.

El autor da en el último capítulo una síntesis de la cuestión galileana después de 1632. Se menciona que el decreto de prohibición de defender el heliocentrismo fue omitido en la edición del Indice de 1757. De ahí se pasa a 1820, cuando todavía se negó el *imprimatur* a una obra del profesor romano G. Settele por suponer el movimiento de la Tierra, caso de interés más bien anecdótico, ya que toda la cuestión fue originada por los escrúpulos del prefecto del Sacro Palacio. En el fondo no se trataba tanto del movimiento de la Tierra cuanto de la inconveniencia de revocar antiguos decretos. Hubiese sido más significativo haber visto cómo en la práctica interpretaron la omisión del decreto contra la publicación en favor del copernicanismo eminentes astrónomos romanos desde 1757; por ejemplo R. Boscovich y G. Calandrelli. (J. C.)

Cerebro

Circunvoluciones

So human a brain. Knowledge and values in the neurosciences. Dirigido por Anne Harrington. Birkhäuser; Basilea, 1992.

Chance and design. Reminiscences of science in peace and war, por Alan Hodgkin. Cambridge University Press, Cambridge, 1992.

Neuroanatomy. Selected papers of Walle J. H. Nauta. Birkhäuser; Basilea, 1993.

The computational brain, por Patricia S. Churchland y Terrence J. Sejnowski. The MIT Press; Cambridge, 1992.

Brain and memory. Modulation and mediation of neuroplasticity. Dirigido por James L. McGaugh, Norman M. Weinberger y Gary Lynch. Oxford University Press; Oxford, 1995.

Tan nuestro. Esa podría ser la traducción de urgencia, y quizá precisa, de *So Human a Brain*, un obra escogida al azar entre las muchas que están apareciendo desde un enfoque pluridisciplinar, planteamiento que parece necesario para desmadejar la complejidad del cerebro. El crítico, sin embargo, prefiere atenerse a la vieja máxima metodológica que aconseja dividir lo compuesto para vertebrar luego coherentemente las partes. Por eso, sacaremos mayor provecho de este libro si lo leemos antes, y al final de, otros que aborden aspectos particulares: biofísica neuronal (*Chance and Design Reminiscences of Science in Peace and War*), técnicas instrumentales (*Neuroanatomy. Selected Papers of Walle J. H. Nauta*), modelos computacionales (*The Computational Brain*) y propiedades específicas (*Brain and Memory. Modulation and Mediation of Neuroplasticity*).

El avance de la neurología permite proceder de abajo arriba, del intercambio iónico al sistema nervioso. Sin embargo, las explicaciones moleculares e incluso celulares se reconocen impotentes a la hora de describir ra-

zonadamente el comportamiento de un organismo, por elemental que éste sea, y así otros prefieren el enfoque de arriba abajo. En una cosa todos están de acuerdo: en el recurso cómodo a la evolución, a la presión de selección natural, cuando no se dispone de otro punto de apoyo.

A lo largo de la evolución, el prosencéfalo de los humanos se ha expandido hasta constituir una estructura que refleja su dependencia ancestral de reptiles y mamíferos. La transición evolutiva de los reptiles a los mamíferos se caracterizó por la adquisición de comportamientos arquetípicos: el cuidado de los hijos, la comunicación vocal y el juego. Esa transición implicó una progresiva elaboración de la corteza primitiva que cubre la convolución que Pierre Paul Broca llamó gran lóbulo límbico.

De Franz Joseph Gall arranca la idea de la localización anatómica de la función, hipótesis apoyada por las observaciones clínicas de Broca, Carl Wernicke, John Hughlings Jackson y otros neurólogos del siglo pasado, y en el nuestro por histólogos (Santiago Ramón y Cajal) y neurofisiólogos (Charles Sherrington). A lo largo de los últimos cien años se han identificado las distintas áreas cerebrales; en los cuarenta postreros, los mecanismos de información neuronal, eléctrica o bioquímica, y desde hace diez empezamos a conocer receptores y canales iónicos.

No se hubiera llegado a crear un cuerpo teórico de las funciones cerebrales sin el refinamiento concomitante de los métodos físicos y de las técnicas empleadas. Alan Hodgkin, autor de *Chance and Design. Reminiscences of Science in Peace and War*, abrió el surco de la biofísica. (Entre los recuerdos de su vida, al lector español le llama la atención el trato un tanto displicente para con Lorente de Nó, con quien se cruza en el laboratorio de Gasser en el Instituto Rockefeller. Se adivina que los ataques inmisericordes trascienden las diferencias académicas parar recalar en antagonismos políticos. El círculo de amigos íntimos de Hodgkin militaba, incluso con las armas, a favor de la república, en tanto que nuestro neurólogo defendía al bando contrario.)

En sus primeros escritos, sobre la transmisión eléctrica en el nervio, Hodgkin explicaba que el punto de partida había sido la observación de que un impulso nervioso que llegaba a un zona local bloqueada aumentaba la excitabilidad del nervio allende el punto del bloqueo. El potencial de acción superaba de lejos el valor necesario para excitar el segmento siguiente del nervio. El impulso debía ser capaz de sobrepasar 1 o 2 mm de nervio inactivo, una predicción verificada más tarde. Terminada la segunda guerra mundial, se le asoció Andrew Fielding Huxley con quien trabajó en la medición del comportamiento eléctrico y químico de fibras nerviosas aisladas, que, a la postre, les valdría el Nobel (compartido con sir John Eccles) en 1963.

Hodgkin y Huxley desarrollaron en 1952 el primer análisis matemático del potencial de acción. Asociaron el axón a un cable eléctrico, con fuerza electromotriz, resistencia y capacitancia. Las conductancias iónicas podían cambiar a través del tiempo. Las constantes de cierre y apertura de los canales iónicos se establecía experimentalmente. Con ese planteamiento, el estímulo externo produce una despolarización de la membrana por encima de su valor umbral (unos –60 mV); le sigue a ello una entrada brusca de iones sodio que cambia el potencial de membrana hasta + 30 mV; los canales sodio comienzan entonces a cerrarse y el canal de ion potasio dependiente de voltaje se abre, repolarizando la célula.

En neurología la innovación técnica lleva el nombre de Walle J. H. Nauta, quien ha escogido, en *Neuroanatomy. Selected Papers of* ..., una treintena de artículos que compendian su contribución de medio siglo. Los agavilla en las siguientes secciones: técnicas de degeneración, cerebro y comportamiento, organización general del sistema nervioso central, ganglios basales, sistema límbico y estriado, y corteza cerebral.

A Nauta se deben los métodos de tinción que permitieron cartografiar las vías de conducción nerviosa en el cerebro. Empezó por la búsqueda de un método de tinción que fuera selectivo de fibras en degeneración, sin reducirse empero a las mielinizadas. La consiguió en 1952, junto con Paul Gygax.

¿En qué consiste la técnica de Nauta? El sistema nervioso consta de billones de neuronas conectadas entre sí por dendritas y axones. El tejido nervioso forma una red complicada de vías o circuitos. Aunque el conocimiento de las vías no puede por sí mismo explicar cómo opera el cerebro, la cartografía de las conexiones nerviosas es requisito imprescindible para tal comprensión. Vías y circuitos se habían descubierto con la ayuda de las técnicas clásicas de tinción. La de Nauta y Gygax se basa en la impregnación argéntea selectiva de axones degenerados. No hubo ilustración de vía nerviosa que apareciera en las revistas de los años cincuenta, sesenta y bien entrados los setenta que no se realizara con su método.

En 1972 esta técnica cedió el paso a la autorradiografía de Cowan que parte del principio según el cual todas las neuronas sintetizan proteínas y las transportan a través de los axones. Si inyectamos en el sistema nervioso aminoácidos radiactivamente marcados, éstos penetran en el soma celular y se incorporan en las proteínas que emigran hasta los terminales axónicos, donde pueden detectarse por un proceso de autorradiografía. La principal ventaja del método estriba en que sólo el soma celular y no el axón absorbe los aminoácidos inyectados. Tal interiorización selectiva pone de manifiesto las proyecciones que emergen de las células.

El método de la peroxidasa de rábano simboliza, más que ninguna otra, el éxito de las técnicas trazadoras modernas. Desde su introducción hace más de veinte años, como método de transporte retrógrado, se han ensayado con otras muchas proteínas como trazadores retrógrados. El método de la peroxidasa produce resultados más rápidos que la autoradiografía.

Se ha avanzado también en las técnicas invasivas que posibilitan lesiones reversibles y microlesiones. Los agentes farmacológicos bloquean ya sinapsis específicas. El ácido gamma-aminobutírico, (GABA), importante neurotransmisor inhibidor, puede aplicarse en la corteza y otras áreas para hiperpolarizar ciertas neuronas y por tanto silenciar la generación de potenciales de acción.

Por su parte, las técnicas de formación de imágenes de la actividad fisiológica dependen de la introducción de trazadores y colorantes que son sensibles a variables fisiológicas. Se ayudan, además, de la potencia del computador para procesar el enorme flujo de información. La tomografía computerizada tiene una resolución espacial de 1 mm de sección, buena para distinguir el hipocampo de la amígdala. La resonancia magnética presenta mapas de mayor resolución espacial, de 0,1 mm.

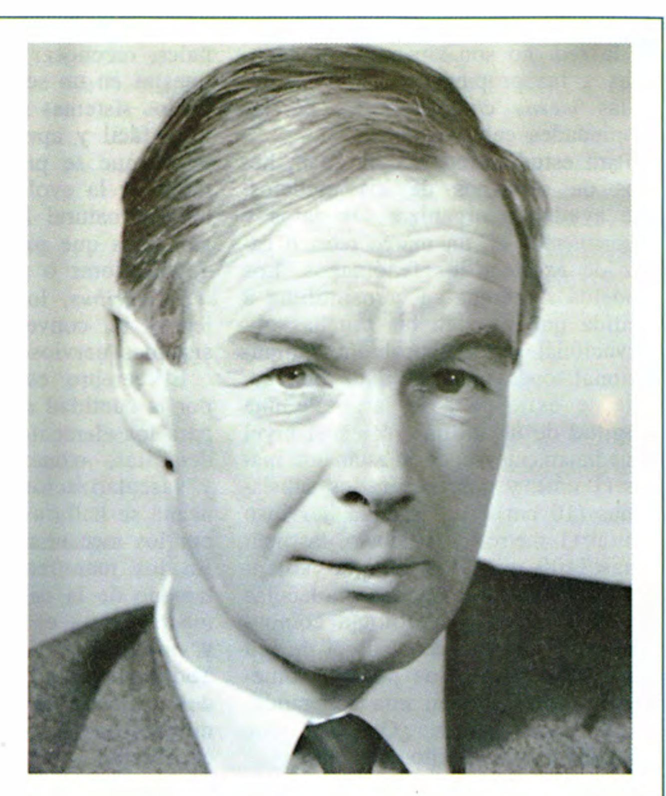
Nauta considera el cerebro como un complejo de sistemas integrados e integradores. Recordemos su trabajo reciente sobre los vínculos entre el cuerpo estriado, por un lado, y la corteza cerebral y el sistema límbico, por otro. El hemisferio cerebral consta de tres reinos anatómicos y funcionales principales: el neocórtex, el sistema límbico y el sistema extrapi-

Ecuación de Hodgkin-Huxley

$$I = C\left(\frac{dV_m}{dt}\right) + (V_m - E_{K^+})\, g_{K^+}\, n^4 + (V_m - E_{Na})g_{Na^+}\, m^3\, h + (V_m - E_L)\, g_L$$

La ecuación describe la corriente I que atraviesa una membrana con un potencial V_m. El primer término de la derecha indica la capacitancia de la membrana: la capacitancia C multiplicada por la tasa de cambio del potencial de membrana con el tiempo, $C\,(dV_m/dt)$.

El segundo término describe la corriente de ion potasio, expresada mediante la diferencia entre el potencial de la membrana y el potencial de equilibrio del potasio $(V_m - E_{K^+})$, que es la fuerza eléctrica efectiva que actúa sobre los iones K^+, multiplicada por la conductancia máxima de potasio g_{K^+} y una variable n elevada a la cuarta potencia. La variable n, un factor de activación, es función del potencial de membrana y el tiempo. El tercer término de la derecha, $(V_m - E_{Na^+})\ g_{Na^+} m^3\, h$, simboliza la corriente del ion sodio, en la cual la fuerza conductora es $(V_m - E_{Na^+})$, la conductancia máxima de Na^+ es g_{Na^+}, m es un factor de activación elevado a la tercera potencia y h es el factor de inactivación. El término final toma en consideración la corriente transportada por otros iones, principalmente K^+ y Cl^-, a través de los canales de conductancia. Esta ecuación, introducida por Hodgkin y Huxley para explicar el potencial de acción del axón del calamar gigante, se ha generalizado a otras neuronas.



Alan Hodgkin

ramidal (ganglios basales o cuerpo estriado). Tradicionalmente, se le asignaba al neocórtex el nivel superior de análisis sensorial e integración perceptiva, así como los mecanismos que responden de la función somática y motora; amén de suponérsele el sustrato básico de los procesos de ideación. El sistema límbico constituiría el representante cerebral del medio interno, que se expresa a través de los afectos y motivación. Por último, de los ganglios basales dependería el sistema motor somático. Nauta acepta la fundamentación de esa consideración tripartita. Con alguna matización, empero. Entre las razones para ello hay una potísima anatómica: las observaciones acumuladas indican que esas tres subdivisiones se hallan más estrechamente conectadas de lo que se vino considerando hasta entonces (1989). En particular se han identificado varios lugares en los cuales su circuitería respectiva converge y, por ende, podría conducir a unos canales efectores comunes o paralelos.

¿Pueden los sistemas integrados del cerebro dar cuenta de las funciones superiores, las que llamamos mentales? En el número precedente de *Investigación y Ciencia* se reseñaba la respuesta de Penrose. Otro enfoque es el reduccionista defendido por Patricia S. Churchland y Terrence J. Sejnowski en *The Computational Brain.* La línea de argumentación viene a ser la siguiente: la ciencia suele avanzar al explicar los fenómenos de macroescala por sus componentes de microescala. Estos últimos son, por lo común, conceptualmente contraintuitivos, observacionalmente invisibles y experimentalmente difíciles de manejar. A modo de ejemplos, la temperatura de un gas no es más que la energía cinética media de las moléculas constituyentes; las propiedades de la materia derivan de los átomos componentes y, en definitiva, de sus capas de electrones. Nuestra vida psicológica, al tratarse de un fenómeno natural, arguyen, habrá de hallar su explicación en las propiedades de la infraestructura.

Esos últimos componentes, postulan, se encuentran en las neuronas. Ahora bien, mientras que una neurona no ve, ni razona, ni recuerda, los cerebros sí lo hacen. ¿Como salta el cerebro, del movimiento de los iones a través de las membranas, a la memoria o la percepción? Rechazan de plano el dualismo cartesiano. Para la teoría reduccionista, en la situación actual de la ciencia parece muy verosímil que los procesos psicológicos sean procesos físicos. Aunque "a fuer de francos, el materialismo no es un hecho establecido, en la forma en que la estructura helicoidal de cuatro bases es un hecho establecido". Pero insisten en que es la suya la hipótesis de trabajo más plausible, más que las esbozadas por Thomas Nagel, J. C. Eccles, John Searle y Penrose.

La visión reduccionista tiene su camino de vuelta en el emergentismo. Las propiedades emergentes son efectos de alto nivel que dependen de los fenómenos de bajo nivel. O en su formulación negativa: es improbable que las propiedades emergentes no puedan explicarse por propiedades irreductibles de bajo nivel. Todo es cuestión de tiempo; lo que hoy carece de justificación experimental, mañana podría encontrarla. Y de cautela. No hemos de esperar que la interpretación reduccionista de las propiedades emergentes sea sencilla o directa, que dimane con llaneza de los meros datos.

En puridad, si entendemos el comportamiento de las partes, debiéramos comprender el desenvolvimiento del todo, conocer de qué modo los animales ven, aprenden y actúan. Puesto que no ocurre así, nuestras limitaciones se atribuyen a la ignorancia de los procesos de interacción. Y ante la insuficiencia de tal estrategia, los autores se ven forzados a matizar este reduccionismo a ultranza, apelando a la dinámica de las redes neuronales. Aunque las propiedades de las redes dependen

de las propiedades de las neuronas de la red, no son sin embargo idénticas a las propiedades celulares, ni a las *meras* combinaciones de las propiedades celulares.

Para estudiar redes, continúan, hemos de servirnos de los modelos, que ayudan a organizar los datos y experimentos en un marco teórico capaz de explicar los fenómenos. Los modelos aumentan su verosimilitud a medida que resisten las pruebas observacionales. La neurología computacional opera en el nivel de red. Esta se extiende a lo largo de una longitud de un milímetro; en el nivel inmediatamente superior están los mapas (1 cm), y por encima los subsistemas (10 cm) y el sistema nervioso central (1 metro); por debajo, las neuronas (100 micrometros), las sinapsis (1 micrometro) y las moléculas (1 angstrom). La neurología computacional se mueve en el nivel de red porque sus resultados pueden someterse a contrastación con los modelos de redes reales. ¿Qué hay que considerar a propósito de éstas?

Los sistemas nerviosos, e incluso segmentos de ellos, son computadores. Pero, a diferencia de un computador digital, de alcance general y programable para ejecutar un algoritmo, el cerebro es una colección de sistemas de finalidad particular que son muy eficientes en el desarrollo de las tareas encomendadas, aunque limitadas en su flexibilidad.

El sistema nervioso es un producto de la evolución, no un diseño ingenieril. Las modificaciones evolutivas se realizan siempre en el contexto de una organización y arquitectura preexistentes. La naturaleza no es un ingeniero inteligente que pueda desmantelar la configuración existente y comenzar de la nada. No puede moldear las condiciones ambientales y construir un ingenio óptimo. En consecuencia, las soluciones computacionales desarrolladas por la naturaleza podrían ser disímiles de las que inventa la inteligencia humana, y pudieran resultar ni óptimas ni predecibles desde supuestos ingenieriles ortodoxos.

Otra cuestión de importancia crítica se refiere al tiempo disponible para llevar a cabo la computación. Desde el punto de vista del sistema nervioso, no basta con alcanzar soluciones que confieran una respuesta correcta ante un estímulo dado. La solución debe estar disponible también en milisegundos desde la presentación del problema, y las aplicaciones deben presentarse en unos pocos cientos de milisegundos. Es importante que los sistemas nerviosos puedan detectar rutinariamente señales, reconocer pautas y reunir respuestas en un segundo. La capacidad de los sistemas nerviosos para movilizar fácil y apropiadamente cuerpos en bloque se privilegió en cada estadio de la evolución, ya que la selección natural favorecería a los organismos que pueden escapar de los depredadores o plantarles cara. *Caeteris paribus*, los sistemas nerviosos lentos se convertirían en pasto de sistemas nerviosos más rápidos.

El cerebro está limitado también por la cantidad de espacio disponible para los elementos esenciales: somas, dendritas, axones, células de la glía y vascularización. La capacidad craneana se halla a su vez condicionada por los mecanismos de reproducción. En los mamíferos, por ejemplo, el tamaño de la cavidad pelviana de la madre limita el tamaño de los hijos y, por ende, del cerebro de los hijos. Todo esto significa que la extensión del cableado debe estar también limitado. Para economizar en cableado el cerebro cartografía las unidades de procesamiento, lo que significa que el mismo axón puede emplearse en un amplio rango de representaciones.

Hay que contar además con la energía disponible, que el cerebro administra con suma eficacia. Una neurona emplea aproximadamente 10^{-15} joules de energía por operación (e.g., una neurona que activa a otra en una sinapsis). A modo de comparación, la tecnología de silicio más eficiente requiere de ordinario unos 10^{-7} joules por operación (multiplicar, sumar, etcétera). Usando el criterio de joules por operación, el cerebro es unos siete u ocho órdenes de magnitud más eficiente que el mejor de los microcircuitos de silicio.

Por último están las limitaciones impuestas por los materiales de construcción. Esto es, las células están formadas por proteínas y lípidos, que tienen que apoyarse en las mitocondrias para su suministro de energía; los sistemas nerviosos deben tener las substancias y las disposiciones necesarias para el crecimiento y el desarrollo, y deben aprovechar las propiedades de la membrana celular y los elementos químicos para operar como computadores orgánicos. Además, el sistema nervioso necesita un suministro constante de oxígeno y una aportación fiable de nutrientes.

Pese a tales exigencias, las redes nerviosas pueden modelizarse, insisten. "Muchos datos deslabazados pero poca teoría", suele objetarse aún. Una afirmación juiciosa, toda vez que seguimos ignorando cómo piensa el cerebro. Los partidarios de la modelización por ordenador responden que se está salvando esa distancia.

Se defienda la postura que se defienda, lo obligado de momento es acudir al laboratorio para conocer los procesos cerebrales que acompañan a las funciones humanas. Sirva de ejemplo la memoria, a través de *Brain and Memory. Modulation and Mediation of Neuroplasticy*. Un siglo entero de investigación cumple ya el tema sobre cómo el cerebro nos permite adquirir, retener y utilizar información. Los cincuenta primeros años culminaron con la obra de Lashley y Hebb. La introducción de nuevas técnicas en la segunda mitad del siglo ha permitido acotar las bases neurológicas del aprendizaje y la memoria.

La experiencia almacenada en el aprendizaje y la memoria a largo plazo conforma la personalidad de cada uno. No otra cosa son los "años de formación". La experiencia altera los contenidos de la memoria. Según sean éstos y la forma en que se hallen organizados, podremos aprender mejor y más fácilmente determinados asuntos. Se ha comprobado que la liberación de algunas hormonas y neurotransmisores en respuesta a la experiencia regulan la formación de los contenidos. Por ejemplo, las inyecciones sistémicas de epinefrina o de glucosa refuerzan la memoria; la activación de opioides y GABA daña el lenguaje y la memoria, en tanto que su inactivación refuerza el aprendizaje y la memoria.

En la experiencia, la emoción desempeña un papel determinante. Pensemos en el miedo. La amígdala, implicada en la adquisición y expresión de la memoria emocional, recibe información sensorial procedente de los núcleos lateral y basolateral; a su vez, estos núcleos se proyectan hacia el núcleo amigdaloide central, que luego se proyecta hacia distintas zonas del hipotálamo y del tallo cerebral. La estimulación eléctrica de la amígdala desencadena muchos de los comportamientos empleados para definir un estado de miedo, mientras que la estimulación de áreas diana seleccionadas de la amígdala produce efectos más selectivos.

Se ahonda también en las bases neurológicas de la memoria estudiando su degeneración. Hay una pérdida natural de la memoria, asociada con la edad, y una pérdida patológica. En 1907 Alois Alzheimer daba cuenta de la historia de una mujer de 51 años que sufría mermas de memoria declarativa y espacial, desorientación temporal e inestabilidad afectiva. Rea-

lizada la autopsia, Alzheimer descubrió lo que hoy se conocen como los signos distintivos de la enfermedad que lleva su nombre: amasijos neurofibrilares y placas seniles. La base fisiológica responsable de la pérdida de función de aprendizaje y memoria asociada con Alzheimer reside en la disfunción neurítica. No parece que la naturaleza progresiva del Alzheimer y su incidencia creciente con la edad se deba a un solo factor. Antes bien, podría ser que una serie de mecanismos reguladores alterados constituyan irónicamente respuestas adaptativas a procesos patológicos. (L. A.)

Genética

Regulación en eucariotas

GENE REGULATION IN EUKARYOTES, por Edgar Wingender. VCH Verlagsgesellschaft mbH; Weinheim, 1993.

El estudio de los mecanismos moleculares que controlan la expresión de la información contenida en los genes constituye uno de los temas centrales de la biología molecular. Para la realización de una determinada función biológica no basta con disponer de los genes correspondientes a los diferentes elementos implicados en la misma, es, además, necesario que la información contenida en los mismos se exprese en el momento oportuno y de manera coordinada. Así por ejemplo, la diferenciación celular se consigue a través de la expresión ordenada y secuencial de diferentes genes a lo largo del desarrollo. La pregunta es cómo se lleva cabo el control de dicho proceso.

Durante la última década, los avances en el conocimiento de los mecanismos de control de la expresión génica han sido impresionantes. Por ello, el libro *Gene Regulation in Eukaryotes* de E. Windenger aparece en un momento muy oportuno. El control de la expresión génica se puede realizar a diversos niveles; como resultado de procesos de multiplicación ("amplificación") génica, durante la transcripción o bien durante el procesamiento del ARN y su posterior traducción. El libro de Windenger se centra fundamentalmente en la revisión de los mecanismos de control de la transcripción y, desde este punto de vista, constituye una obra excelente. El resto de los mecanismos de control de la expresión génica se tratan también en el texto, aunque de una manera muy breve.

En la regulación de la transcripción participan un gran número de elementos reguladores. Algunos de ellos se encuentran en la propia molécula del ADN, son las secuencias reguladoras o "cis-factors", que se localizan principalmente en las regiones promotoras de los genes. Las secuencias reguladoras suelen ser dianas de reconocimiento para factores proteínicos específicos, los factores de transcripción. Existen centenares de factores de transcripción en las células eucarióticas. La mayoría de ellos están implicados en el reconocimiento específico de las secuencias reguladoras; pero también existen factores reguladores que intervienen en la formación de los complejos de transcripción a través de interacciones proteína-proteína.

Básicamente, los factores de transcripción se clasifican en tres categorías: las ARN polimerasas, los factores generales de transcripción, asociados a cada una de las polimerasas, y los específicos, responsables de la expresión selectiva de determinados genes en momentos concretos del desarrollo y diferenciación celulares o en respuesta a determinados estímulos externos.

El libro comienza con una breve descripción de los tres tipos de ARN polimerasas presentes en las células eucarióticas. La ARN polimerasa II es responsable de la transcripción de la mayoría de los genes eucarióticos, mientras que las ARN polimerasas I y III son más especializadas, siendo responsables de la transcripción de los genes ribosómicos y de los que codifican para ARN pequeños. En la formación de los complejos de transcripción participan, además de la ARN polimerasa, un número determinado de factores generales de transcripción que intervienen en la regulación de la transcripción de la casi totalidad de genes conocidos. Una parte importante del texto se dedica a la descripción detallada de estos factores generales de transcripción que, en la mayoría de los casos, son específicos para cada una de las tres polimerasas. No obstante, algunos de los factores generales, principalmente la "TATA-proteína unión", o TBP, son comunes a las tres polimerasas. Este factor reconoce específicamente las regiones TATA, que constituyen el elemento regulador más general presente en las regiones promotoras.

Existen otros factores de transcripción que reconocen secuencias reguladoras que no se encuentran presentes en todos los genes y que, por tanto, no pueden considerarse factores generales. Algunos de ellos, como el factor Sp1 o los "CCAAT-factores de unión", intervienen en la regulación de un gran número de genes mientras que otros son mucho más específicos de gen o familia génica. En general, son estos factores específicos los responsables de la activación selectiva de determinados genes en momentos concretos.

Los motivos estructurales utilizados por los diferentes factores de transcripción en su interacción específica con las secuencias reguladoras son comunes a muchos de ellos. En consecuencia, los factores de transcripción también pueden clasificarse en función de estos motivos estructurales. Este aspecto también es discutido en el texto, describiéndose los motivos estructurales comunes —"dedos de zinc", "hélice-bucle-hélice", "cremalleras de leucina", etc.— presentes en los dominios de unión al ADN de los factores de transcripción.

Esta obra constituye una revisión muy completa de los mecanismos que intervienen en la regulación de la transcripción. Su lectura es obligada para aquellos investigadores y estudiantes que, en algún momento, pudieron creerse desbordados por la complejidad y variedad de tales mecanismos. (F. A.)





Conformación cúbica y octaédrica del ADN

Catherine D. DeAngelis

Sobre beneficios y costes en la asistencia sanitaria

El elevado coste de las prestaciones sanitarias y el paralelo encarecimiento de los productos industriales que las mismas requieren han fusionado de tal modo los campos de la medicina y de la economía que hoy las firmas comerciales están sólidamente implantadas en las oficinas de los hospitales, o en su trastienda. Paul Samuelson definió así la economía: "el estudio de la manera como los hombres (*sic*) y la sociedad acaban decidiendo el empleo de recursos productivos escasos, que podrían tener otros usos, para producir determinados artículos y distribuirlos al consumo, actual o futuro, entre gentes de diversos grupos sociales. Analiza tal estudio los costes y beneficios de las mejoras que puedan introducirse en las formas de asignar los recursos."

En ese horizonte, compréndese muy bien que, para definir los objetivos de la asistencia sanitaria, se utilice el análisis de costes y beneficios, en especial habida cuenta de que los recursos son cada vez más limitados. Pero pueden plantearse graves conflictos si la interpretación de ese análisis se confía a la competencia de administradores y gerentes que se preocupen por las cifras más que por la atención al paciente.

El análisis de costes y beneficios implica suponer que las variables son conmensurables, o sea, que se las puede medir con una misma unidad de medida, digamos en pesetas constantes. Ahora bien, puesto que esa óptica no es la más adecuada, debe sustuirse por otro enfoque. El análisis de la rentabilidad debe tomar en consideración elusivos intangibles, tales como la calidad de vida, el dolor y el sufrimiento, lo que se escapa a una evaluación en términos conmensurables. Algunos costes, como por ejemplo lo que se gasta en un tratamiento o el salario que se deja de percibir, son calculables en pesetas; otros costes, como la mortalidad (años de vida perdidos) y la morbilidad (dolor y sufrimiento) sólo son subjetivamente medibles, pero se les da un valor numérico. En la eficacia, que es la otra cara de la moneda, se incluyen resultados tales como los años de vida ganados y la disminución de la morbilidad.

Generalmente, a mayor eficacia mayor coste. Esto lleva a la cuestión básica: ¿Vale el beneficio lo que cuesta, o el ahorro de costes justifica suficientemente la aceptación de un menor beneficio? Y en seguida debemos inquirir: ¿desde qué punto de vista se responde a tal pregunta: desde el del enfermo, desde el del médico, desde el del gerente o desde el punto de vista de la sociedad? Cada una de estas diferentes perspectivas puede además cambiar según el papel que desempeñe el sujeto cuando tenga que decidir. Por ejemplo, el médico quizá piense de distinto modo que un enfermo. La clave está en quién toma las decisiones.

El análisis de la rentabilidad de lo invertido supone que los costes y los beneficios son evaluados igualmente por todos y que lo que es bueno para todos lo es para cada uno. Pero es obvio que esto no siempre es verdad. Los análisis de la rentabilidad suelen hacerse sobre estadísticas y promedios de población, mientras que, en la práctica, las decisiones asistenciales se toman durante cada acto médico. Puesto que cada acto médico es distinto, la responsabilidad del médico para con el enfermo difiere a menudo mucho de su responsabilidad para con la sociedad. Si el médico es un empleado a sueldo o un funcionario, el que imparte los cuidados no es el que administra las finanzas, y podría producirse una situación más difícil aún.

El análisis del rendimiento de la inversión se basa en comparar dos o más alternativas asistenciales. De ordinario se tienen en cuenta los resultados clínicos, los del servicio prestado y los gastos. En los clínicos se incluyen variables tales como los años de vida ganados o perdidos y el estado funcional del paciente; en los del servicio, la satisfacción del paciente respecto a las instalaciones, a los profesionales y a los empleados; en los gastos, el dinero pagado por los servicios y por las complicaciones de la terapia.

Con una administración asistencial en rápido desarrollo, los resultados económicos son los factores primordiales a la hora de tomar decisiones. Esto puede ir en perjuicio de los pacientes. Por ejemplo, ponerle a un niño una inyección a la semana es mucho menos caro que intervenirle quirúrgicamente, pero si a ese niño le aterrorizasen tanto las inyecciones que a causa de ellas tuviese pesadillas y trastornos de conducta, en tal caso el procedimiento más caro sería el más económico.

La mayoría de los que se afilian a mutuas asistenciales eligen la opción menos cara porque suponen que en todas las opciones los resultados serán los mismos. Cuando la economía domina las decisiones, el precio es el factor prioritario; sólo se consideran seriamente otros si entre los competidores son iguales los precios.

En una economía de mercado es probable que lo siguiente que se considere sea el rendimiento de los servicios. Las decisiones se toman considerando el tiempo de espera, el tipo de instalaciones y otros factores. El valor relativo de estos rendimientos se puede calcular mediante poco costosas encuestas con las que se averigüe cómo evalúan los pacientes los cuidados que reciben. Lo peligroso de utilizar en este terreno valores comerciales es que un breve rato de espera en una salita cómoda y bien decorada se tendrá probablemente por mejor que una larga espera en un local desagradable, dándose con ello menos importancia al rendimiento clínico: los auténticos resultados médicos, que requieren caros y complicados exámenes, pruebas y comparaciones, pasan a ser considerados en último lugar.

Nuestra sociedad corre el peligro de dejar que la administración de la sanidad, aferrada a la contabilidad económica, dicte cómo haya de ser la práctica clínica. Ese análisis financiero puede servir de ayuda en la toma de decisiones, pero la determinación final debe permanecer en manos del médico.